

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO DE APALPADORES PARA MEDIR COMPRIMENTOS  
COM SUSPENSÃO EM GUIAS DE MOLAS PARALELAS LAMINADAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA.

JOSÉ SÉRGIO IANINO SOARES

SETEMBRO - 1979

CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO DE APALPADORES PARA MEDIR COMPRIMENTOS  
COM SUSPENSÃO EM GUIAS DE MOLAS PARALELAS LAMINADAS

JOSÉ SÉRGIO IANINO SOARES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE

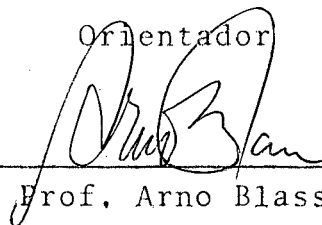
"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICA-  
ÇÃO, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Hermann A.H. Lücke, Dr.-Ing.

Orientador



Prof. Arno Blass, Ph.D.

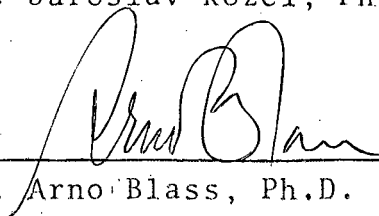
Coordenador

BANCA EXAMINADORA



Prof. Hermann A.H. Lücke, Dr.-Ing.

Prof. Jaroslav Kozel, Ph.D.



Prof. Arno Blass, Ph.D.



Prof. Carlos Alberto Schneider, Ph.D.

A meus pais  
Ao meu filho

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Lücke, pela orientação na realização deste trabalho.

Ao Prof. Kozel e sua equipe do Laboratório de Metrologia, pela valiosa colaboração na realização dos ensaios.

Ao Prof. Blass, pela orientação durante o curso e auxílio na revisão redacional deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Máquinas Operatrizes, pela dedicação na fabricação dos modelos.

Ao Convênio FINEP 394/CT, que possibilitou a realização da parte experimental, através de auxílio financeiro.

## SUMÁRIO

SIMBOLOGIA .....	viii
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
NOTA EXPLICATIVA .....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Generalidades sobre o controle dimensional .....	1
1.1.1 - Importância do controle dimensional .....	1
1.1.2 - Sistema de medição .....	1
1.1.3 - Medição de comprimentos .....	2
1.2 - Desenvolvimento atual da medição de comprimentos com apalpadores .....	3
1.2.1 - Processos atuais com padrão real .....	3
1.2.2 - Processos atuais com padrão virtual .....	4
1.3 - Medição de comprimentos integrada ao processo de fabricação .....	6
1.4 - Objetivos deste trabalho .....	7
2. EXIGÊNCIAS TÉCNICAS PARA APALPADORES .....	9
2.1 - Condições geométricas .....	9
2.1.1 - Forma das peças .....	9
2.1.2 - Contato entre a peça e a ponta do apalpador .	9
2.1.3 - Posição de contato .....	9
2.1.4 - Número de coordenadas .....	12
2.1.5 - Limitações do espaço físico .....	14
2.2 - Força de medição .....	17
2.3 - Exigências metrológicas para apalpadores .....	18
3. SISTEMAS ATUALMENTE UTILIZADOS EM APALPADORES - BREVES COMENTÁRIOS .....	23
3.1 - Sistemas mecânicos .....	23

3.2 - Sistemas pneumáticos .....	23
3.3 - Sistemas eletro-eletrônicos .....	24
3.3.1 - Apalpadores resistivos .....	24
3.3.2 - Apalpadores capacitivos .....	25
3.3.3 - Apalpadores indutivos .....	25
3.3.4 - Apalpadores eletro-óticos .....	26
3.4 - Resumo comparativo dos sistemas atualmente utilizados .....	27
4. DESENVOLVIMENTO DE UM APALPADOR COM GUIAS DE MOLAS PARALELAS .....	29
4.1 - Definição do projeto .....	29
4.2 - Sistema de transmissão mecânica do sinal .....	29
4.2.1 - Sistema de molas paralelas .....	30
4.3 - Projeto do apalpador .....	33
5. PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIOS COM APALPADORES ...	36
5.1 - Parte mecânica .....	36
5.2 - Parte elétrica .....	37
5.3 - Automatização .....	38
5.4 - Calibração .....	38
5.5 - Regulagem e alinhamento dos dispositivos .....	39
6. ENSAIOS REALIZADOS .....	45
6.1 - Ensaios com apalpadores .....	45
6.2 - Ensaios complementares com sistemas de duas molas paralelas .....	47
7. RESULTADOS .....	52
7.1 - Resultados dos ensaios com apalpadores .....	52
7.1.1 - Força de medição na direção nominal x .....	42
7.1.2 - Erros na direção de medição e erros de posição dos apalpadores .....	53
7.2 - Resultados dos ensaios com sistemas de duas molas paralelas .....	59

8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	60
8.1 - Força de medição .....	60
8.1.1 - Forças dos apalpadores na direção nominal x .....	60
8.1.2 - Forças dos sistemas de duas molas paralelas	61
8.2 - Análise comparativa dos erros de medição dos apalpadores ensaiados .....	62
8.2.1 - Erros para um mesmo deslocamento .....	63
8.2.2 - Erros dos apalpadores quando sujeitos a forças e momentos iguais .....	64
8.3 - Aplicações práticas dos resultados obtidos .....	64
8.4 - Comportamento do banco de ensaio .....	69
8.4.1 - Erros do padrão de deslocamentos .....	71
8.4.2 - Erros do padrão de forças .....	71
8.4.3 - Erros no padrão de momentos .....	71
8.4.4 - Erros devidos à deflexão estrutural .....	72
8.4.5 - Erros devidos ao atrito e vibrações .....	72
8.5 - Erros devidos ao próprio apalpador .....	73
8.6 - Sugestões para futuras experiências com apalpadores .....	73
9. CONCLUSÕES .....	75
BIBLIOGRAFIA .....	77

## SIMBOLOGIA

<u>Símbolo</u>		<u>unidade</u>
b	dimensão, largura	mm
C	capacitância elétrica	F
D	dimensão, diâmetro	mm
e	tensão elétrica	V
E	módulo de elasticidade	N/mm <sup>2</sup>
F	força	N
F <sub>a</sub>	força de atrito	N
F <sub>n</sub>	força normal	N
F <sub>t</sub>	força tangencial	N
F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub> , F <sub>z</sub>	força na direção x, y e z	N
g	aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
h	dimensão, espessura	mm
I	momento de inércia	mm <sup>4</sup>
K	coeficiente constante	
ℓ	dimensão, comprimento	mm
L	indutância	H
M <sub>x</sub> , M <sub>y</sub> , M <sub>z</sub>	momento com eixo em x, y e z	N.mm
n	rotações por minuto	rpm
r	dimensão, raio	mm
R	resistência elétrica	Ω
S	deslocamento	mm
v	velocidade tangencial	m/s
ω	velocidade angular	rad/s
x, y, z	direção dos eixos coordenados no sistema cartesiano. Quando usado em equações, referem-se a deslocamentos nas direções x, y e z	
X <sub>a</sub> -X	erro na direção de medição para um deslocamento na direção x	μm
Y, Z	deflexões parasitas nas direções y e z para um deslocamento na direção x	μm
X*, X <sub>a</sub> *	erro na direção de medição (X*-referência, X <sub>a</sub> *-apalpador ensaiado) devido a forças F <sub>y</sub> e F <sub>z</sub> e momentos M <sub>x</sub> , M <sub>y</sub> e M <sub>z</sub>	μm



$Y^*, Z^*$	erro de posição nas direções $y$ e $z$ , devido às forças $F_y$ e $F_z$ e momentos $M_x$ , $M_y$ e $M_z$	$\mu\text{m}$
$\Phi$	fluxo luminoso	$\ell\text{m}$
$\beta$	deflexão angular no plano do movimento nominal	
$\alpha$	deflexão angular no plano normal ao do movimento nominal.	

## RESUMO

Com o desenvolvimento das máquinas de medição em três coordenadas (3D) e seus respectivos apalpadores 3D, os apalpadores com guias de molas laminadas ganharam um novo destaque. Novas construções tem sido pesquisadas com a finalidade de obtenção de apalpadores com melhores características e/ou utilização em sistemas com maior grau de automatização. As poucas fontes que descrevem as propriedades das guias de molas laminadas não abordam o comportamento destes sistemas quando atuam momentos ou forças perpendiculares à direção do movimento principal.

Neste trabalho foram analisadas as principais exigências para a construção de apalpadores 3D e apalpadores em geral. Com base nesta análise, foram construídos modelos de apalpadores com guias de molas laminadas e dispositivo de testes para apalpadores. Os resultados dos testes feitos em modelos para medição em uma coordenada mostram os erros de medição e deflexões parasitas para deslocamentos na direção de medição (x) e, os erros de posição da ponta do apalpador quando atuam forças nas direções y e z e momentos com eixos em x, y e z. Os erros na direção de medição dos apalpadores testados foram <1%. Os resultados servem também para estimativas dos erros do apalpador se montado em sistema 3D, utilizando um conjunto de peças intercambiáveis.

Os testes foram feitos utilizando um Sistema Automático de Aquisição de Sinais.

## ABSTRACT

The use of flat spring gage heads has been given more importance with the development of three coordinate (3D) measuring machines. New constructive types have been investigated in order to improve performance characteristics or to increase the level of automatization. However, the few sources describing the properties of flat spring guides do not consider the behaviour of these systems when moments or forces act perpendicularly to the direction of the principal movement.

In this work the more important requirements for the construction of 3D or general purpose gage heads are analysed. Models of flat spring gage heads have been built, and a test rig has been developed. Results of tests in one-dimensional measurements are used to estimate measuring errors and parasite deflections, considering displacements in the nominal direction, and position errors at the tip of the gage head when transversal force or moment components are present. Errors in the displacement direction are less than 1% for the gage heads tested. Results can also be used to estimate errors when mounting the gage head in a 3D system, employing a set of interchangeable parts.

Tests are performed using an automatic data acquisition system.

NOTA EXPLICATIVA

A atividade experimental envolvida na elaboração do presente trabalho foi considerável, e só a análise interpretativa da grande quantidade dos resultados obtidos é relevante às conclusões apresentadas nos capítulos 8 e 9. A inclusão desses resultados aumentaria consideravelmente o volume deste trabalho, e apenas tornaria tediosa sua leitura e compreensão.

Esse material foi, por esse motivo, enfeixado em oito apêndices, constituindo um volume de comprovação dos resultados, alojado no Laboratório de Metrologia e Medições Mecânicas, no Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da UFSC.

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho é uma contribuição ao controle dimensional na fabricação de componentes mecânicos. Partindo da análise das tarefas de medição nesse campo, são definidas as bases para o desenvolvimento de apalpadores para medir comprimentos.

### 1.1 - Generalidades sobre o controle dimensional

#### 1.1.1 - Importância do controle dimensional

O desempenho das partes mecânicas depende principalmente do material usado e da geometria. Um exemplo pode mostrar a importância da precisão geométrica: segundo [1], um erro de 70  $\mu\text{m}$  no passo de uma engrenagem ( $F_t = 2400 \text{ N}$ ,  $n = 3000 \text{ rpm}$ ;  $F_t =$  força tangencial nos dentes de engrenagens) provoca uma pressão sonora de 5  $\mu\text{bar}$  (88 db), o que corresponde a um aumento de 100% sobre a pressão sonora de uma engrenagem com erro desprezível. O número de exemplos relativos a falhas por defeitos dimensionais é ilimitado e, segundo pesquisas [2], medições de comprimentos representam mais de 80% das medições em um processo de fabricação mecânica.

#### 1.1.2 - Sistema de medição

Segundo [3], um sistema de medição generalizado apresenta basicamente três estágios (figura 1.1).

Estágio I - a principal função é ser sensível ao sinal de entrada. É usual, embora não ocorra sempre, a transformação do sinal em sinal de outra natureza.

Estágio II - trata e modifica o sinal para apropriá-lo ao terceiro estágio. Normalmente o sinal é ampliado neste estágio.

Estágio III - apresenta a informação de forma compreensível à sensibilidade humana.

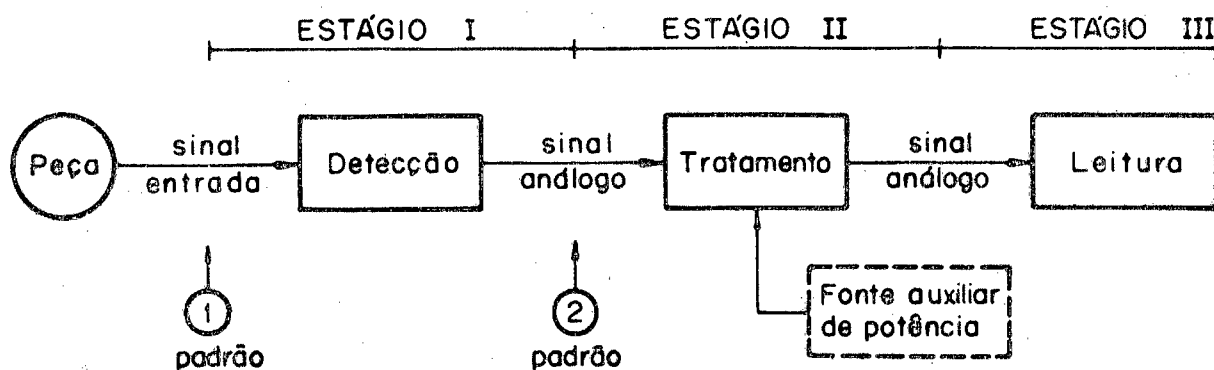


Fig. 1.1 - Sistema de medição generalizado.

### 1.1.3 - Medição de comprimentos

As flechas 1 e 2 na figura 1.1, mostram a comparação por dois métodos diferentes: padrão real e padrão "virtual". A figura 1.2 mostra um exemplo de padrão real. O apalpador A, é ajustado utilizando uma peça padrão B. No segundo método, o padrão é "virtual" e é descrito pela posição da ponta do transdutor móvel no espaço. Geralmente a posição da ponta é medida através de réguas eletro-ópticas.

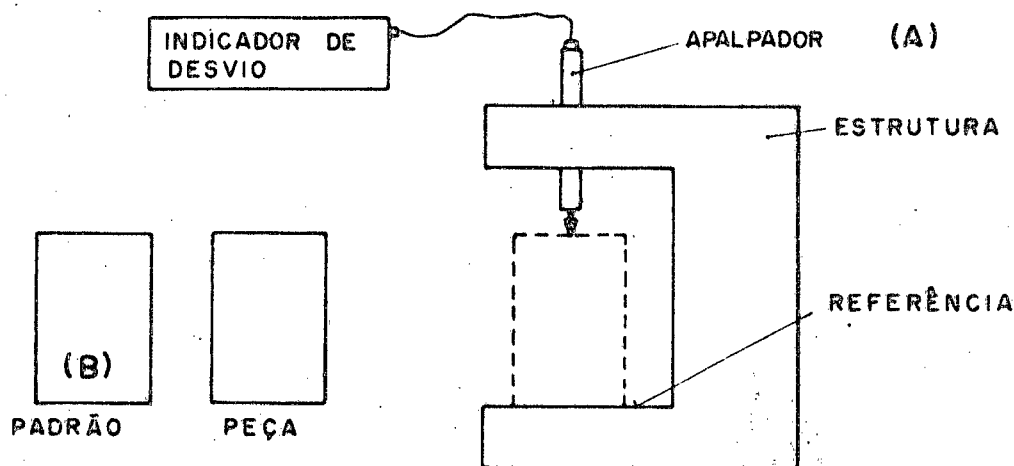


Fig. 1.2 - Diagrama dos principais elementos do sistema padrão real.

## 1.2 - Desenvolvimento atual da medição de comprimentos com apalpa- dores

Uma das tendências que atualmente influem sobre os métodos de medição é a de automatização.

### 1.2.1 - Processos atuais com padrão real

As figuras 1.3a, 1.3b e 1.3c [4] mostram um exemplo de automatização com padrão real.

Observando as figuras, o processo pode ser descrito:

#### 1. dimensões medidas

- diâmetros entre pontos móveis (posições 3 e 4)
- diâmetros entre um ponto móvel e um fixo (posições 2 e 5)
- diâmetros de roscas (posição 7)
- diâmetros de entalhes (posições 1 e 6)
- comprimentos (posições 8, 9, 10 e 11).

#### 2. adaptação de dispositivos

- pontas de contato apropriadas para cada tipo de medição como ponta 2 para diâmetros, ponta 9 para comprimentos e ponta 6 para entalhes.
- dispositivos para posicionamento, como suportes 12, 13 e 14 fixos; 15 e 16 móveis com molas.

O sistema é ajustado por uma peça padrão. Os pontos são medidos simultaneamente e as diferenças em relação ao padrão são sinalizadas eletricamente. O dispositivo atende então à definição de um sistema automatizado [5].

#### Características de sistemas automatizados

- sequência própria

- programação

- capacidade de decisão

#### Características de dispositivos

- medição de pontos simultaneamente

- Indica as diferenças em relação ao padrão

- sinaliza eletricamente quando ocorrem falhas

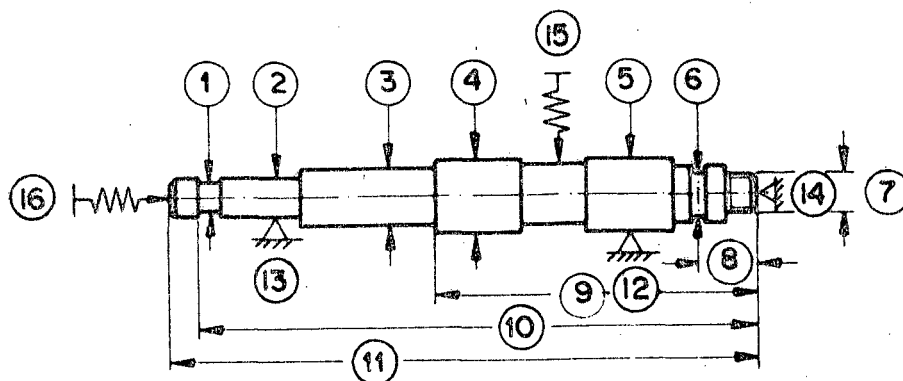


Fig. 1.3a - Diagrama dos pontos controlados na medição de um eixo

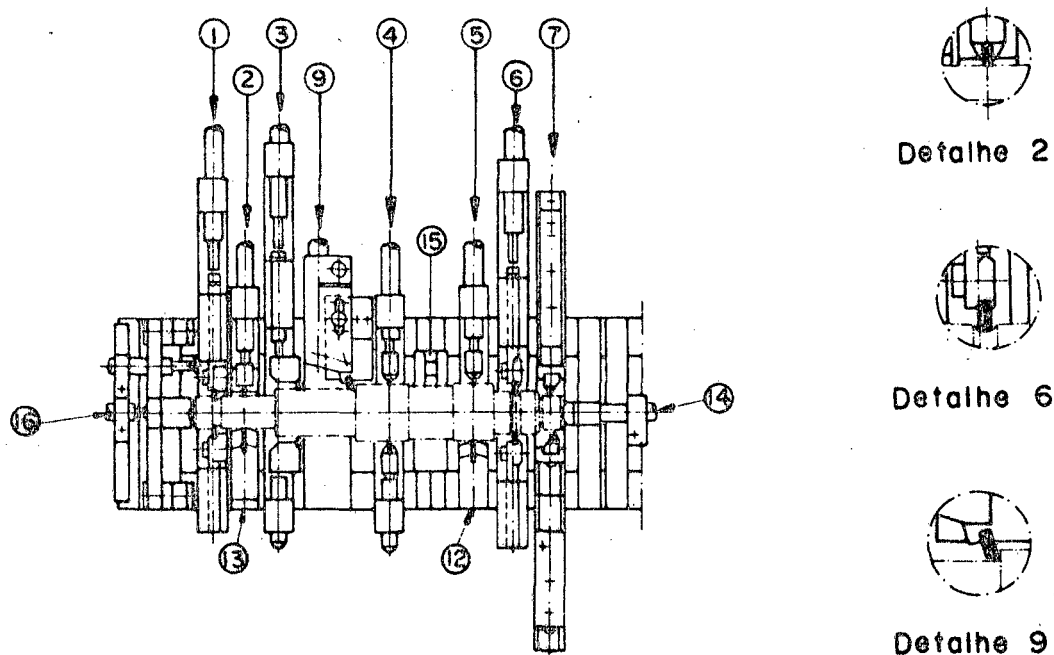


Fig. 1.3b - Disposição dos suportes e apalpadores, detalhe das pontas.

A figura 1.4 mostra um dispositivo de outro fabricante [6]. Neste exemplo é utilizado um único tipo de apalpador com dispositivos, com guias de molas paralelas, que permite a medição com várias pontas em várias posições.

#### 1.2.2 - Processos atuais com padrão "virtual"

A figura 1.5 [7] mostra um exemplo de processo padrão "virtual": uma máquina de medir tridimensional (3D).

Máquinas 3D medem corpos de qualquer forma no espaço. A medição é feita através do movimento relativo entre o corpo e a



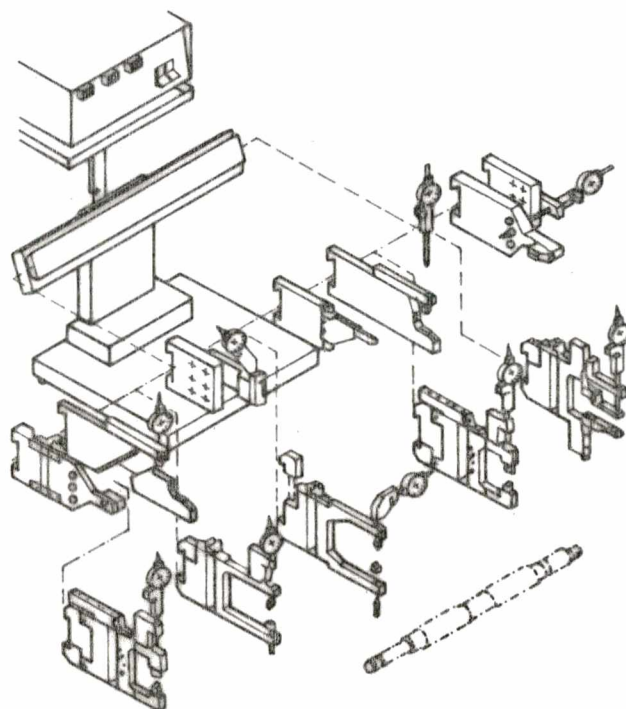
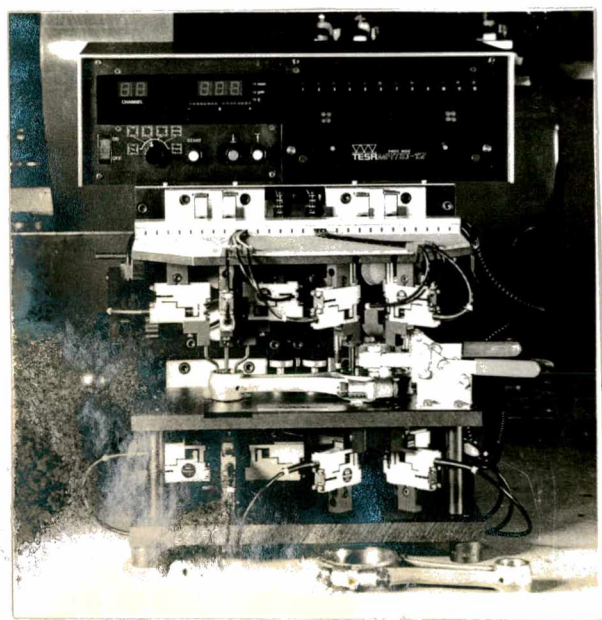
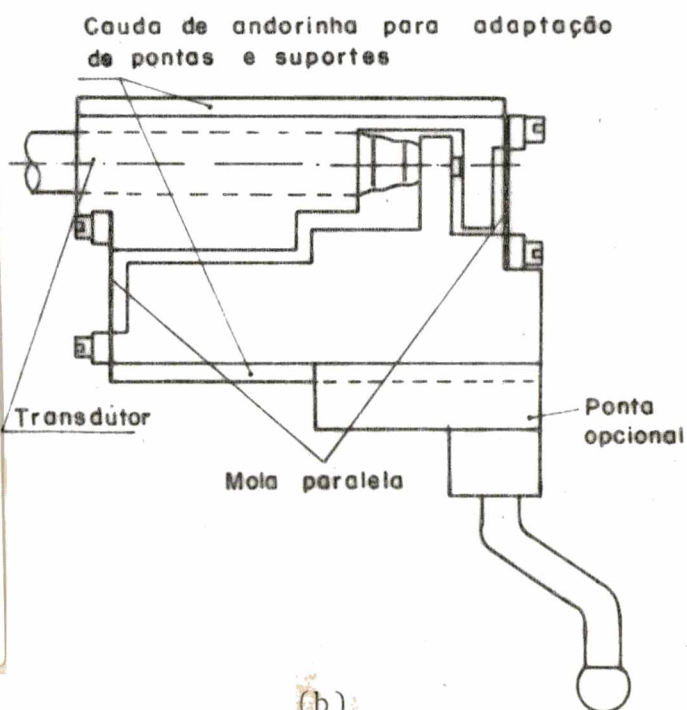


Fig. 1.3c - Detalhe das diferentes peças complementares.



(a)



(b)

Fig. 1.4 - a) Sistema de posicionamento para apalpadores, com guias de molas paralelas [6]; b) detalhe da guia com um tipo de ponta.

ponta do apalpador. Em geral, a leitura do posicionamento é através de réguas eletro-ópticas. A ponta do apalpador atua como ponto de referência dos movimentos de duas maneiras: a) a haste é rígida-

da e sua ponta representa um ponto de referência fixo na máquina de medição; b) A haste possui movimento próprio com pequeno curso. O ponto de referência é obtido através da zeragem do sistema, com putando o deslocamento do apalpador, em geral por transformação e letrônica indutiva. A evolução do processo de medição em máquinas 3D depende também do desenvolvimento de apalpadores 3D.

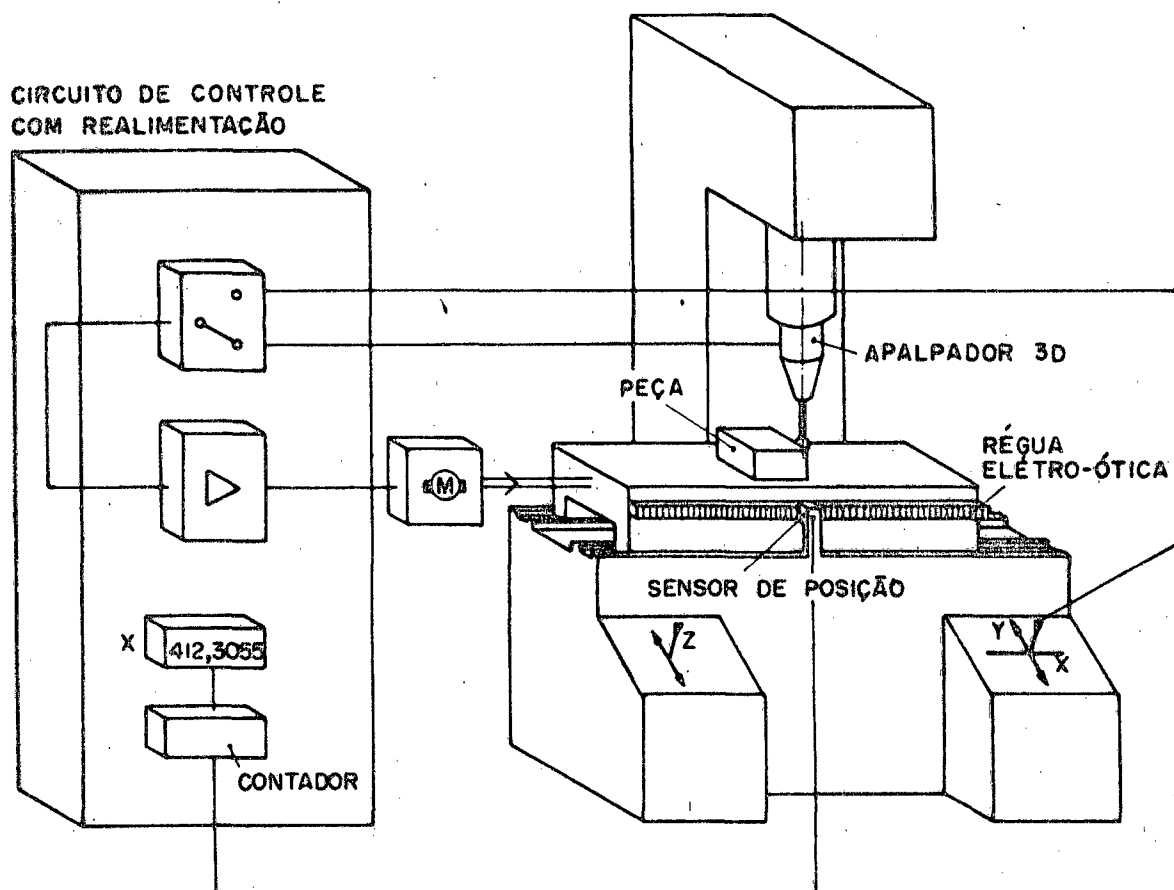


Fig. 1.5 - Máquina de medição 3D com sistema de leitura automático [7].

### 1.3 - Medição de comprimentos integrada ao processo de fabricação

A figura 1.6 mostra esquematicamente dois processos de medição utilizados na fabricação.

A figura 1.6a representa a medição em etapas, com a peça na máquina. A figura 1.6b representa a medição contínua durante a fabricação.

A evolução dos processos de medição na fabricação também depende do desenvolvimento dos apalpadores.

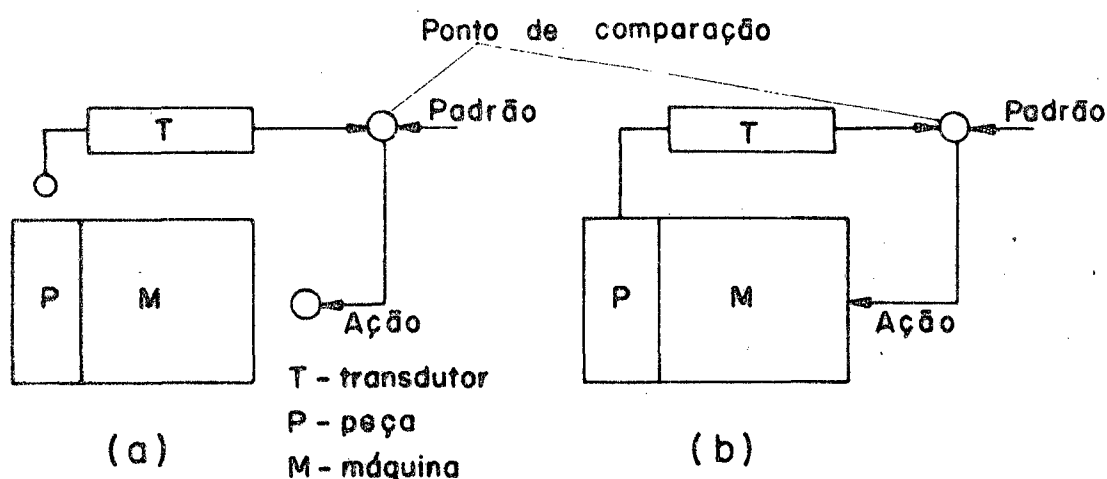


Fig. 1.6 - (a) Medição em etapas, entre operações; (b) medição contínua durante a fabricação.

#### 1.4 - Objetivos deste trabalho

Foram mostrados brevemente os diferentes processos de medição de comprimentos e suas aplicações, assim como a importância dos apalpadores nesses processos. Este trabalho situa-se no ramo de desenvolvimento de apalpadores e pretende dar os primeiros passos para unir as duas linhas principais já descritas:

- Medição com padrão real
- Medição com padrão "virtual"

Este trabalho constitui a etapa inicial do desenvolvimento de um conjunto de peças padronizadas e intercambiáveis que, por montagens opcionais, possam ser utilizadas em sistemas semelhantes aos das figuras 1.3 e 1.4, com menor número de peças complementares e com as quais se possa, também, montar um apalpador 3D. Ressalte-se que apalpadores 3D somente podem ser comprados com máquinas 3D, com elevado custo. Sendo essa proposição de trabalho muito ampla, são presentemente abordados somente os seguintes itens:

1. Definição das exigências para a construção de apalpadores.
2. Breve discussão comparativa dos apalpadores usuais
3. Desenvolvimento de um apalpador com suspensão em molas laminadas.

4. Desenvolvimento de um dispositivo para testes com o apalpador construído e apalpadores em geral.
5. Medição com o apalpador construído com força e deflexão na direção de medição  $x$  e verificação dos erros devidos à aplicação de forças nas direções  $y$  e  $z$  e momentos com eixos em  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

O último item caracteriza este trabalho como original, já que na pesquisa bibliográfica feita pelo autor, não foram encontradas informações sobre o efeito de forças laterais e momentos. A referência [17] que é baseada em exaustiva pesquisa bibliográfica, confirma a não existência de fontes sobre o assunto. A verificação dos erros dos apalpadores quando atuam forças laterais e momentos é de fundamental importância para o desenvolvimento de apalpadores 3D.

## 2. EXIGÊNCIAS TÉCNICAS PARA APALPADORES

### 2.1 - Condições geométricas

#### 2.1.1 - Forma das peças

Em medição 3D, em geral a ponta do apalpador deve percorrer a peça com os mesmos movimentos que a ferramenta que a usou. Para visualização destes movimentos foi montada a figura 2.1, que mostra as formas que ocorrem em fabricação mecânica. A partir das formas é possível uma programação dos movimentos da ponta do apalpador, obtendo-se deste modo padrões "virtuais". A figura 2.1 serve também de base para algumas exigências para apalpadores como, por exemplo, forma da ponta de contato e possibilidade de acesso.

#### 2.1.2 - Contato entre a peça e a ponta do apalpador

O estabelecimento de um contato definido e efetivo entre a peça e a ponta do apalpador é importante para minimizar erros na medição. O quadro abaixo serve de critério geral da forma do contato [8]:

Tipo de peça	Forma da ponta do apalpador		
Plana	esfera	ponta (puntiiforme)	
Curva	cilindro	cunha	esfera

A figura 2.2 [9] mostra diversas formas de pontas, desenvolvidas por fabricantes de apalpadores para proporcionar um contato. As figuras 2.3a e 2.3b mostram dois exemplos de contato.

#### 2.1.3 - Posição do contato

A importância da precisão do posicionamento é ilustrada

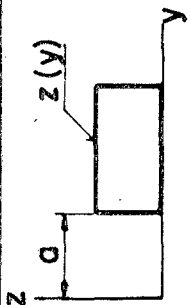
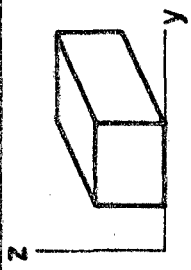
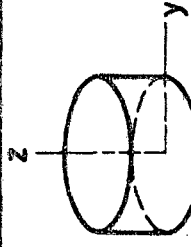
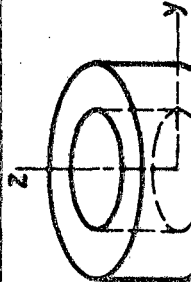
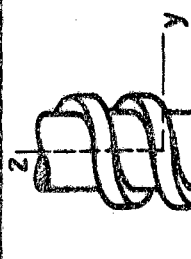
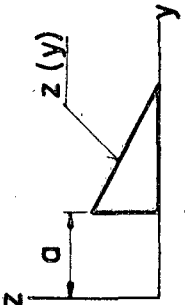
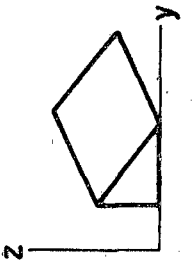
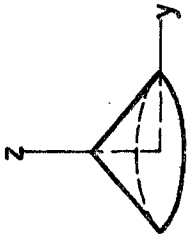
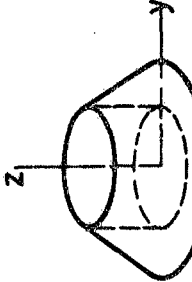
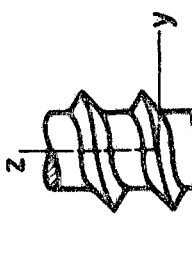
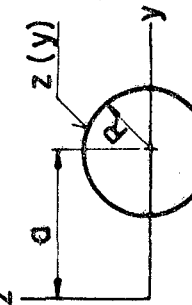
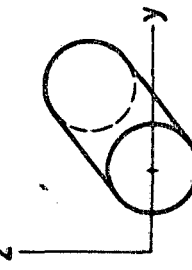
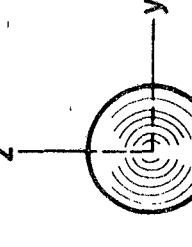
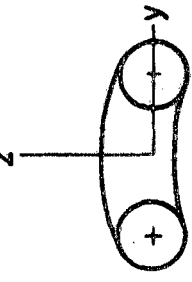
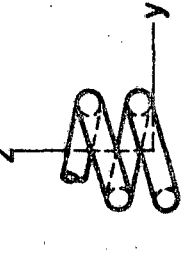
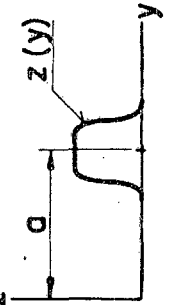
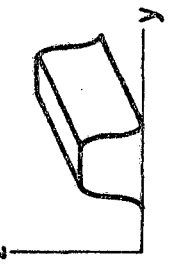
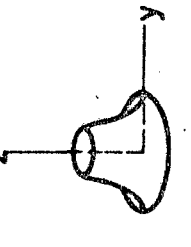
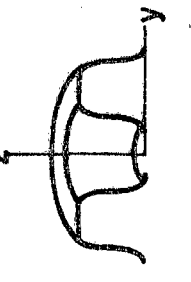
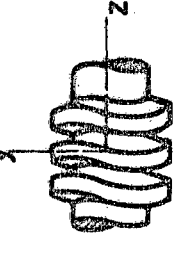
SEÇÕES PLANO ZY	A TRANSLAÇÃO X	B ROTAÇÃO Z $\alpha = 0$	C ROTAÇÃO Z $\alpha \neq 0$	D TRANSLAÇÃO E ROTAÇÃO Z
1 $z(y) = k$ 				
2 $z(y) = c \cdot y$ 				
3 $z(y) = \sqrt{R^2 - (y-a)^2}$ 				
4 $z(y) = f(y)$ 				

Fig. 2.1 - Formas básicas das peças mecânicas.

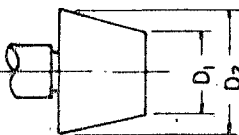
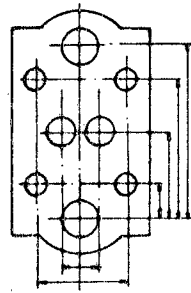
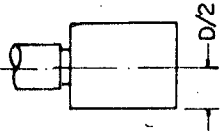
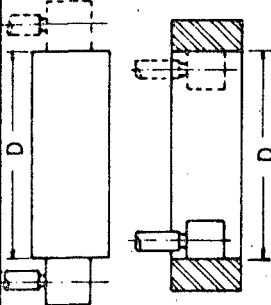
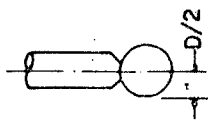
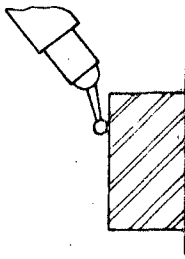
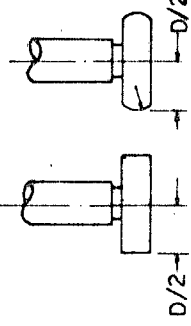
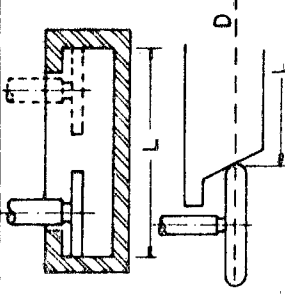
FORMA DE CONTATO	ESQUEMA C/COTAS SIGNIFICATIVAS	APLICAÇÃO	OBSERVAÇÕES
Cônico			Ponta adequada para medições entre pontos virtuais. (autocentragem)
Cilíndrico			Ponta adequada para medições em superfícies externas ou internas com raios maiores que o raio da ponta.
Esférico ou com Ponta Esférica			Tipo mais usual de ponta. Ideal para apalpadores 3D.
Disco Cilíndrico ou com Superfície Esférica de Contato			Pontas usadas em superfícies inacessíveis a outros tipos de pontas.

Fig. 2.2 - Tipos de pontas adequadas para proporcionar o contato entre a peça e o apalpador.

na figura 2.4.

Na medição da retilinearidade da geratriz de um cone, o plano de movimento do apalpador deve conter o eixo do cone. Quando esta condição não é cumprida, o resultado da medição representa um corte do cone ao invés de uma reta [26].

A figura 2.5 destaca as condições de posicionamento na medição de forma, posição relativa, ângulo e distância.

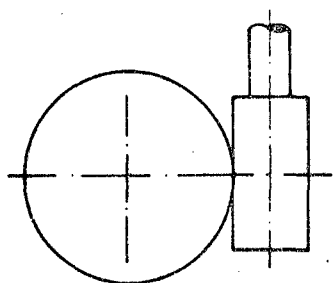


Fig. 2.3a - Peça cilíndrica em contato com ponta cilíndrica.

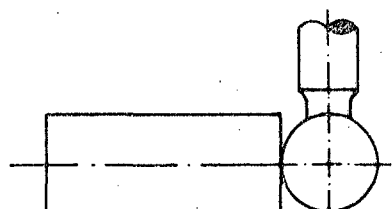


Fig. 2.3b - Peça plana em contato com ponta esférica.

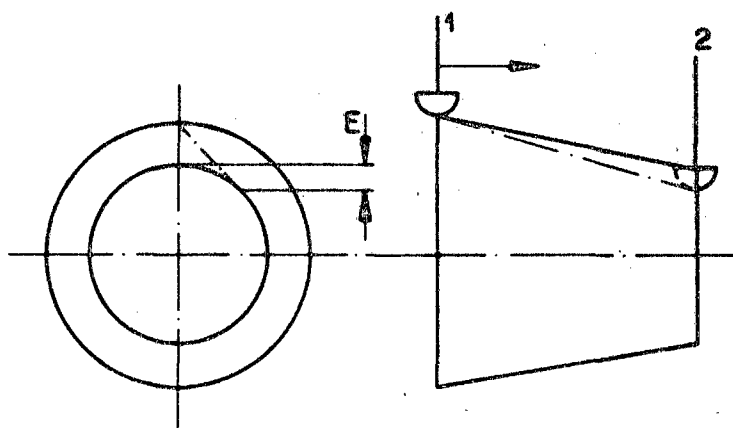


Fig. 2.4 - Erro de medição  $E$  devido a um erro de posicionamento (1 e 2 posições do apalpador).

#### 2.1.4 - Número de coordenadas

A forma e o tamanho das peças são determinadas por mais de uma dimensão, exceto para uma esfera perfeita. O número de coordenadas exigido na medição depende das interrelações geométricas que devem ser controladas. Um exemplo simples é a medição do diâmetro de um eixo. Duas condições podem ocorrer:



MEDIÇÃO	DIAGRAMAS		EXEMPLOS
	EXTERNO	INTERNO	
1 FORMA DE : LINHAS SUPERFÍCIES			 RETILINEIDADE
2 POSIÇÃO ENTRE : LINHAS SUPERFÍCIES			 PARALELISMO
3 ÂNGULO ENTRE : LINHAS SUPERFÍCIES			 $\frac{(D_1 - D_2)/2}{L} = \tan \beta / 2$
4 DISTÂNCIA ENTRE : PONTOS LINHAS SUPERFÍCIES			 COMPRIMENTOS

Fig. 2.5 - Condições de posicionamento na medição de forma, posição relativa, ângulo e comprimento

- admite-se que o eixo é cilíndrico, dentro das tolerâncias estabelecidas para o processo de fabricação, e que a medição do diâmetro é feita em uma coordenada.
- os diâmetros são medidos em relação a um plano de referência utilizando duas coordenadas.

A figura 2.6 mostra exemplos de medições em um, duas e três coordenadas.

#### 2.1.5 - Limitações do espaço físico

Para medição, o apalpador deve se deslocar em duas direções principais: direção de medição e direção normal à direção de medição. Na figura 2.7, pode-se observar que o espaço físico para o movimento e acesso dos contatos é limitado, principalmente para medições internas. O volume do apalpador também é limitado, na direção de medição ou normal à direção de medição, dependendo do tipo de apalpador. As figuras 2.8a e 2.8b mostram dois tipos de apalpadores usuais.

Uma solução para o espaço ocupado pelo apalpador é a utilização de dispositivos para mudança de posição de medição, como sistemas de molas paralelas (fig. 1.4, Capítulo 1).

Com base na breve análise feita, pode-se relacionar as principais exigências físicas para apalpadores. A ordem de apresentação abaixo não envolve grau de prioridade.

- Possibilidade de medir diferentes formas e tamanhos.
- Possibilidade de medir com diferentes pontas.
- Possibilidade de operar com diferentes forças de medição e mantê-las aproximadamente constantes.
- Dispor de contatos facilmente adaptáveis.
- Possibilidade de medir em 3D.
- Ter resistência mecânica adequada ao ambiente de fabricação.
- Possibilidade de ser usado em sistemas automatizados.
- Ocupar pequeno espaço físico.

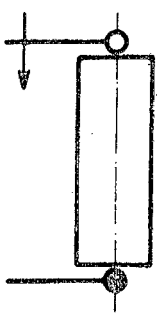
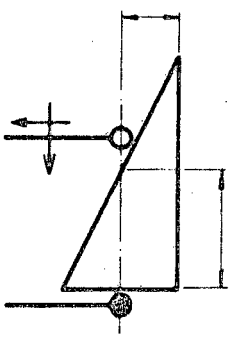
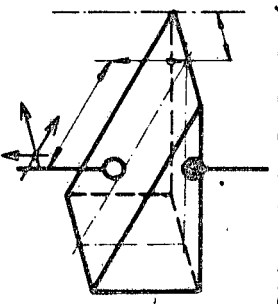
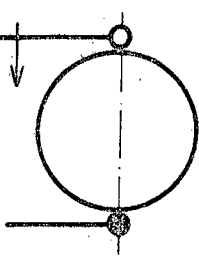
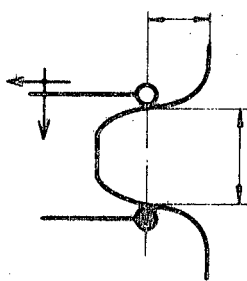
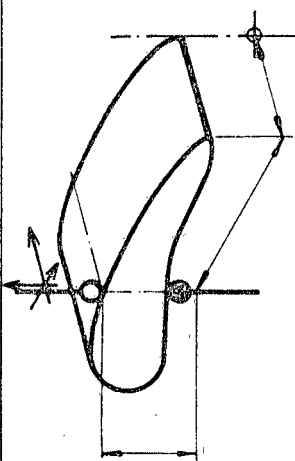
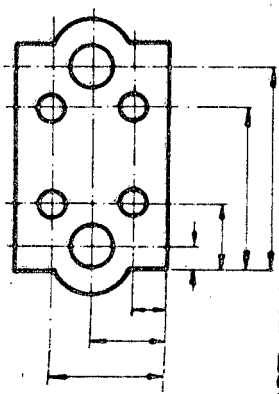
	1 COORDENADAS	2 COORDENADAS	3 COORDENADAS
PLANOS	 <p>DISTÂNCIA</p>	 <p>FORMA DE LINHA</p>	 <p>FORMA DE SUPERFÍCIE</p>
CURVOS	 <p>DISTÂNCIA</p>	 <p>FORMA DE LINHA</p>	 <p>FORMA DE SUPERFÍCIE</p>
LAY-OUT		 <p>DIST. ENTRE PONTOS VIRTUAIS</p>	

Fig. 2.6 - Exemplos de medição em uma, duas e três coordenadas.

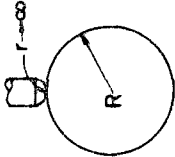
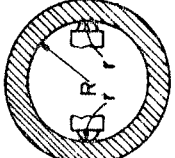
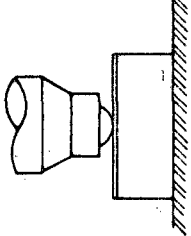

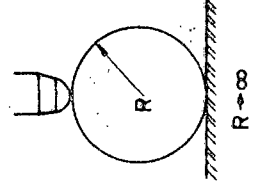
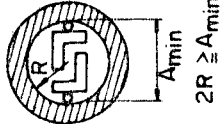
CONDIÇÃO	EXTERNO	INTERNO	OBSERVAÇÕES
Forma da Ponta de Contato			O raio menor da ponta para medidas internas aumenta o erro devido às deformações elásticas. Portanto, a força deve ser reduzida.
Rigidez dos Membros de Contato			A força de medição deve ser somente suficiente para estabelecer o contato, de modo a minimizar os erros devidos às deflexões.
Limitação de Espaço			Em medidas internas há necessidade de espaço para acesso e posicionamento dos contatos no plano de referência selecionado.

Fig. 2.7 - Condições para os elementos de contato entre a peça e o apalpador.

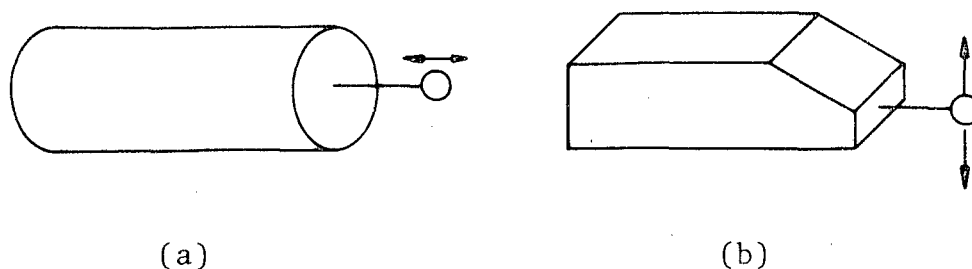


Fig. 2.8 - (a) Apalpador com direção de medição axial; (b) Apalpador com direção de medição transversal.

## 2.2 - Força de medição

Para o estabelecimento do efetivo contato entre a peça e a ponta do apalpador é necessária uma força de medição. Esta força provoca deformações elásticas nas superfícies em contato e deflexões nas partes mecânicas do apalpador. O controle dos erros é facilitado quando a força de medição é mantida aproximadamente constante. A forma e a posição do contato influem nos erros devidos à força de medição.

### - Influência da forma de contato.

As deformações elásticas (achatamentos) podem ser estimadas, utilizando a teoria de contato de Hertz [10], envolvendo coeficientes determinados experimentalmente.

### - Influência da posição de contato

No ponto de contato a força de medição se decompõe em componentes normais e tangenciais, como mostrado na figura 2.9.

As componentes tangenciais deslocam o ponto de contato do plano de medição, causando erros de posição.

### - Atrito

Em medição por contato pode ocorrer movimento relativo entre a ponta do apalpador e a peça. Este movimento é de deslizamento sem lubrificação e deve ser considerado o atrito de Coulomb [11].

As figuras 2.10a, 2.10b e 2.10c mostram três exemplos da atuação da força de atrito onde é fácil observar a possibilidade de ocorrerem erros de posição.

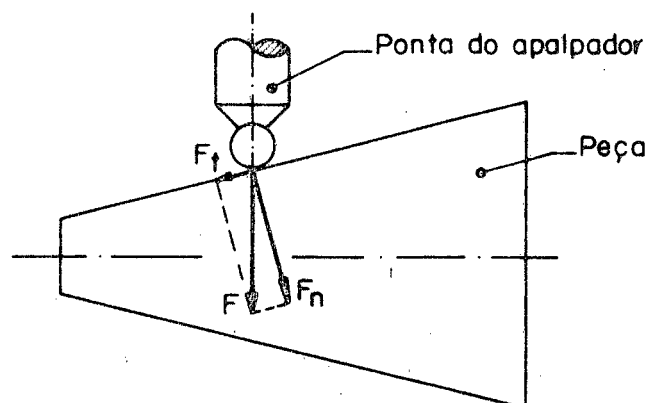


Fig. 2.9 - Componentes normal e tangencial da força de medição.

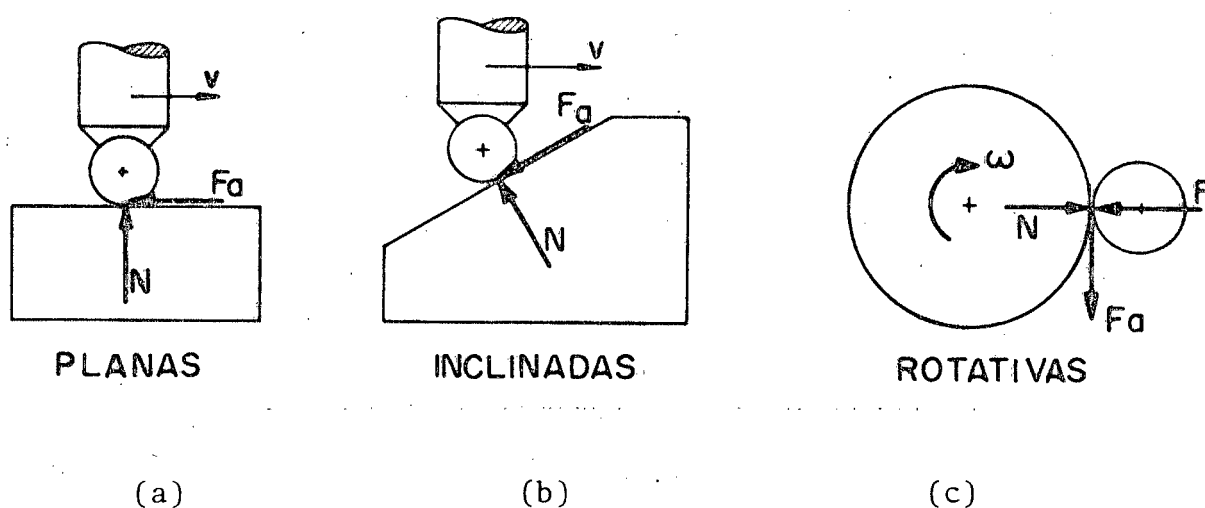


Fig. 2.10 - (a) Força de atrito - peça plana; (b) Força de atrito - peça inclinada; (c) Força de atrito - peça rotativa.

### 2.3 - Exigências metrológicas para apalpadores

Toda a medida  $Z_k$  de um conjunto de  $n$  medidas ( $Z_{nk}$ ) é acompanhada de erros e é uma aproximação do valor esperado ideal, teoricamente exato  $Y_n$  [12]. Para toda a medida corresponde um conjunto de erros

$$\epsilon_{nk} = Z_{nk} - Y_n \quad k = 1, 2, \dots, n$$

ou, em forma adimensional

$$e_{nk} = \frac{Z_{nk}}{Y_n} - 1$$

A medida é dita exata se  $e_{nk} = 0$ . O valor

$$B_{nk} = 1 - |e_{nk}|$$

é chamado exatidão da medida.  $B_{nk}$  é um indicador da fração de  $Y_n$  que é medida pelo apalpador. O valor  $B_{nk}$  é influenciado pelas características estáticas do sistema de medição. As principais, verificadas pela calibração estática, são:

Sensibilidade - em um sistema de medição, a sensibilidade é a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada. A sensibilidade pode ser definida para cada parte do sistema de medição. Para apalpadores, a primeira parte é a transmissão do sinal entre o ponto de contato e o elemento sensor. A figura 2.11 mostra um exemplo para uma guia de duas molas paralelas.

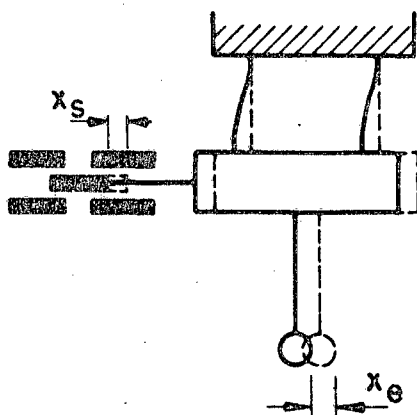


Fig. 2.11 - Sensibilidade  $x_s/x_e$  para a primeira parte do sistema

Não-linearidade - os apalpadores devem apresentar características essencialmente lineares para a faixa de medição especificada. Face a isso, os desvios relativos à não-linearidade constituem o principal fator de erros em medição de comprimentos

A não linearidade pode ser definida de diversas maneiras: proporcional, independente, de pontos finais, terminal, etc. Fabricantes de apalpadores em geral aproveitam esta multiplicidade de definições para obter vantagens comerciais. A definição que será adotada neste trabalho é a da não-linearidade independente, que se refere à linha reta obtida pelo método dos mínimos quadrados, à igual distância de duas retas paralelas que incluem em seu intervalo todos os valores obtidos em um ciclo de calibração. A figura 2.12 mostra um exemplo de não-linearidade independente.

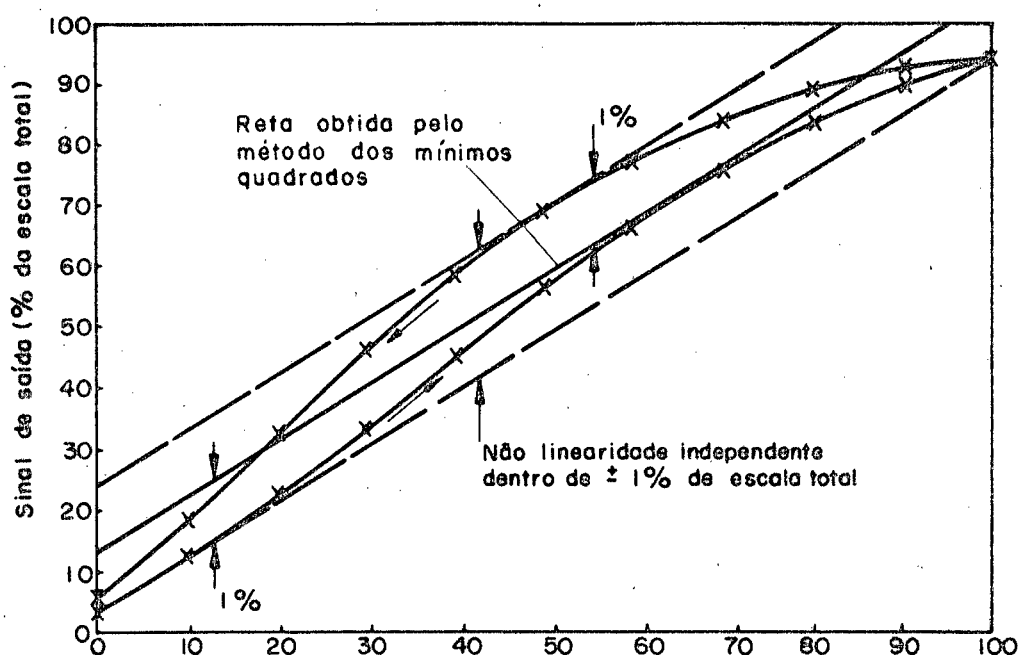


Fig. 2.12 - Não-linearidade independente  $\pm 1\%$  da escala total.  
(Escala de erro: 1:10).

Estabilidade do zero - o deslocamento da curva de calibração para posições paralelas à inicial é definida como não estabilidade do zero. Os erros de não estabilidade do zero são causados principalmente por variação de temperatura, por isso, uma exigência normal para apalpadores é a faixa de temperatura de operação e o erro por grau de variação da temperatura.

Histerese - o efeito de histerese em apalpadores é devido ao atrito e folga.

- atrito interno - as partes do apalpador que sofrem



deflexões armazenam energia no avanço e não a recuperam integralmente no retorno.

- atrito deslizante - o movimento de deslizamento de partes do apalpador é influenciada pelo atrito de Coulomb.

A figura 2.13 mostra um exemplo de histerese para um ciclo.

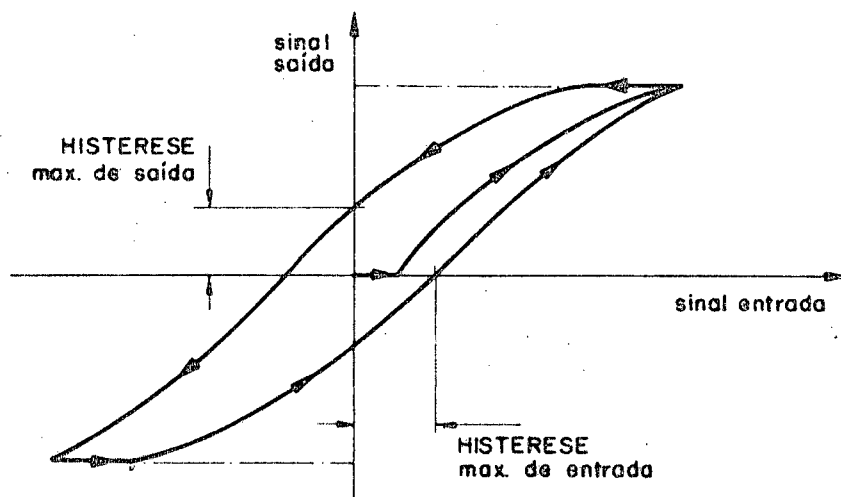


Fig. 2.13 - Efeito da histerese

Força de medição - uma característica necessária para o controle de erros devidos à força de medição é a variação da força por unidade de deslocamento do apalpador. A figura 2.14 mostra a calibração da força de medição de um apalpador TESA com força nominal de 160 mN (16 p). A variação de força neste caso foi de 0,055 mN/ $\mu$ m.

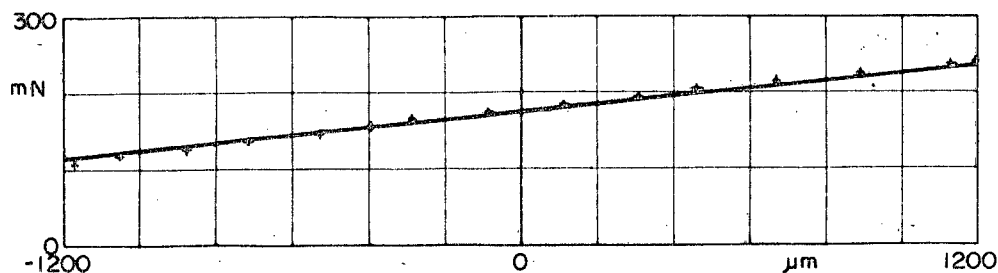


Fig. 2.14 - Calibração da força de medição em apalpador TESA 16p.

Faixa de medição (curso) - é a faixa na qual um apalpador pode medir, mantendo a variação de suas características dentro dos intervalos de confiança previstos na calibração. Em geral, a faixa de medição para apalpadores é definida pelos limi-

tes de não-linearidade da curva de calibração. A figura 2.15 mostra a faixa de medição para um apalpador indutivo tipo LVDT.

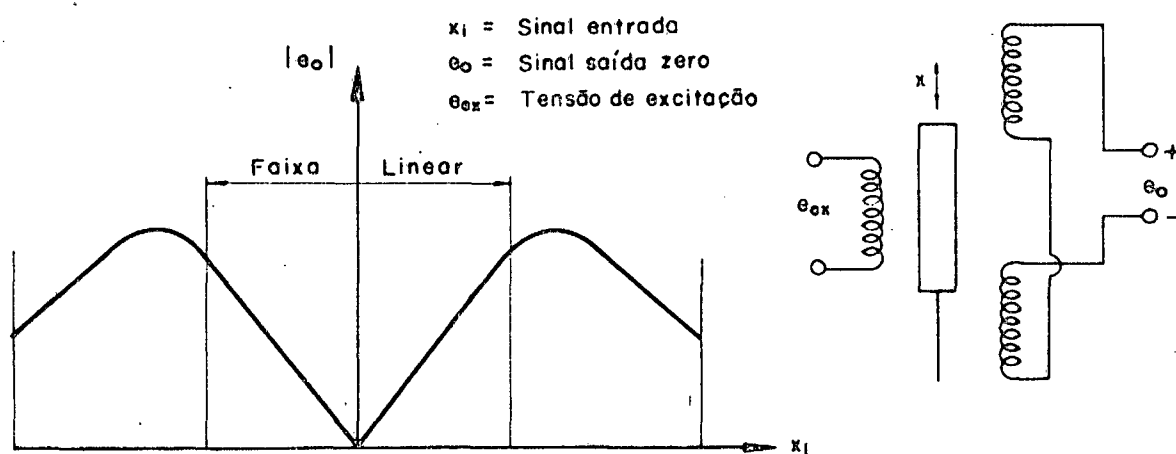


Fig. 2.15 - Faixa de medição bi-direcional simétrica para um LVDT

### 3. SISTEMAS ATUALMENTE UTILIZADOS EM APALPADORES - BREVES COMENTÁRIOS

Os principais sistemas utilizados em apalpadores são:

- mecânicos
- pneumáticos
- eletro-eletrônicos

#### 3.1 - Sistemas mecânicos

Em geral os sistemas mecânicos de medição comparativa reúnem em um único instrumento os três estágios da medição. Uma grande gama de mecanismos é utilizada para ampliação mecânica do deslocamento, como trens de engrenagens, câmes, alavancas, molas de torção ou uma combinação destes com outros elementos.

As principais desvantagens dos sistemas mecânicos são:

- atrito - por ser a transmissão feita através de muitas peças.
- força de medição - em geral mais elevada em relação a outros sistemas.
- automatização - somente possível com adaptação de sistemas elétricos.

#### 3.2 - Sistemas pneumáticos

A operação dos apalpadores pneumáticos é baseada no fenômeno que ocorre quando o ar comprimido, que escapa através de um orifício, tem seu fluxo livre alterado pela proximidade de uma superfície. A distância do orifício à superfície provoca uma variação de pressão que é ampliada e registrada em um sistema de leitura.

Os erros nos processos pneumáticos dependem do sistema utilizado na medição da pressão do ar. O sistema, por sua pró-

pria natureza, está sujeito a um grande número de falhas, provocadas pela qualidade do ar comprimido que supre os sensores.

Os sistemas pneumáticos são usados em alguns processos automatizados como, por exemplo, controle de espessura de chapas em laminação e o controle do diâmetro na retificação de eixos. A principal desvantagem com relação à automatização é a necessidade de sistemas complicados.

### 3.3 - Sistemas eletro-eletrônicos

Os processos de medição de comprimentos utilizando sistemas eletro-eletrônicos estão, cada vez mais, substituindo outros processos. As principais razões dessa preferência são: a simplicidade de construção e a facilidade de automatização. Por outro lado, o atual desenvolvimento no campo da eletrônica tem permitido uma melhora crescente nas características dos apalpadores como, por exemplo, aumento da faixa linear, menor influência de sinais indesejáveis, etc.

Os principais sistemas eletro-eletrônicos utilizados são:

1. Resistivo
2. Capacitivo
3. Indutivo
4. Eletro-ótico

A figura 3.1 mostra esquematicamente os princípios de funcionamento dos apalpadores eletro-eletrônicos de contato e não-contato [25].

#### 3.3.1 - Apalpadores resistivos.

A utilização do princípio de variação da resistência para medição comparativa exige alta tensão de excitação. Devido à necessidade de limitar o calor dissipado, a resistência do potenciômetro ( $R_p$ ) deve ser elevada, aumentando dessa forma o erro de não-linearidade [24]. Outra desvantagem dos apalpadores resistivos é o atrito no contato com a resistência.

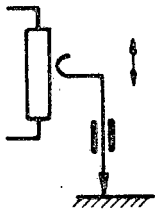

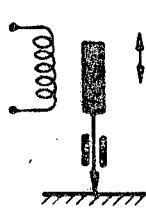
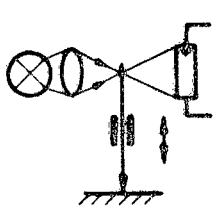
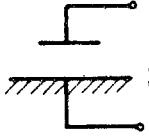
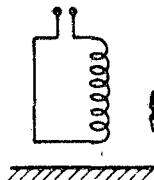
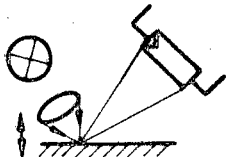
	Resistivo $\Delta S \rightarrow \Delta R$	Capacitivo $\Delta S \rightarrow \Delta C$	Indutivo $\Delta S \rightarrow \Delta L$	Eletro-ótico $\Delta S \rightarrow \Delta \emptyset$
Contato				
Não Contato	—			

Fig. 3.1 - Princípios de funcionamento dos sistemas eletro-eletrônicos para medir comprimentos.

### 3.3.2 - Apalpadores capacitivos

Os sistemas capacitivos em geral utilizam o princípio da variação da capacitância em função da distância entre placas ou em função da variação da área dos eletrodos. As principais desvantagens destes sistemas são:

- exigem sistemas eletrônicos associados não comuns
- são influenciados por sinais indesejáveis devidos a vários fatores, como variação de umidade, comprimento dos cabos, interferência eletrostática, etc.

### 3.3.3 - Apalpadores indutivos

O princípio da variação da indutância em uma bobina de vida ao deslocamento do núcleo, em cursos da ordem de  $\pm 2$  mm, apresenta excepcionais propriedades que justificam a tendência de sua utilização em apalpadores. As principais vantagens são:

- erro de não-linearidade  $< 1\%$  da escala total;

- possibilidade de automatização pela associação de sistemas eletrônicos comuns;
- espaço físico ocupado pequeno;
- não introduzem atrito no sistema;
- construção mecanicamente simples;
- boa resistência mecânica e pouca influência de condições ambientais.

A figura 3.2 mostra o funcionamento e os principais componentes para um sistema indutivo.

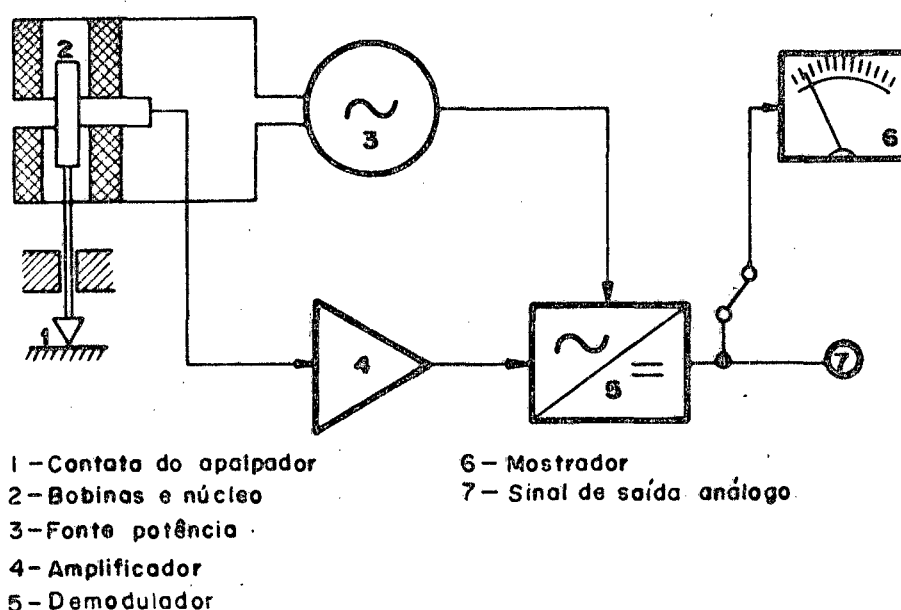


Fig. 3.2 - Diagrama de bloco simplificado de um circuito eletrônico usado em conjunto com um apalpador indutivo.

### 3.3.4 - Apalpadores eletro-óticos

A luz emitida por uma fonte, através de um sistema de lentes, converge ao ponto de medição e, ao ser refletida, é captada por uma fotocélula que transforma a variação do fluxo luminoso em um sinal elétrico. O sistema eletro-ótico vem sendo muito aplicado em réguas de posicionamento para máquinas 3D.

Para aplicação em apalpadores 3D, o sistema apresenta duas características principais como vantagem; curso grande com pequenos erros; como desvantagem; espaço físico ocupado grande.

### 3.4 - Resumo comparativo dos sistemas atualmente utilizados

A tabela 3.1 apresenta um resumo das principais características dos apalpadores mecânicos, pneumáticos, eletro-eletrônicos indutivos e eletro-óticos. A comparação foi restrita aos apalpadores que medem por contato e, com exceção dos eletro-óticos, para a faixa de  $\pm 1000 \mu\text{m}$ .

Tipo	Operação	Curso (mm)	Força (N)	Erro (%)	Direção de medi- ção.
Mecânico	$\Delta S \rightarrow \Delta \theta$	0 ... 1	2	* 0,4	//
	$\Delta S \rightarrow \Delta \theta$	0 ... 0,8	0,15	* 5	$\perp$
	$\Delta S \rightarrow \Delta \theta$	0 ... 0,2	0,15	* 5	$\perp$
Pneumático	$\Delta S \rightarrow \Delta P$	0 ... 1	1 ... 2	* 2	//
	$\Delta S \rightarrow \Delta P$	0 ... 0,2	0,2	* 2	//
Eletrônico indutivo	$\Delta S \rightarrow \Delta L$	$\pm 1$	0,16 ... 4	** -0,1...+0,15	//
	$\Delta S \rightarrow \Delta L$	$\pm 1$	2,2 ... 5,5	** $\pm 1$	// e $\perp$ com molas paralelas
	$\Delta S \rightarrow \Delta L$	$\pm 0,3$	0,3	** $\pm 0,9$	//
	$\Delta S \rightarrow \Delta L$	$\pm 0,3$	0,02... 0,2	** $\pm 2,3$	$\perp$
Eletro-ótico	$\Delta S \rightarrow \Delta \phi$	0 ... 10	0,4 ... 0,7	* 0,02	//
	$\Delta S \rightarrow \Delta \phi$	0 ... 30	0,6 ... 1	* 0,007	$\perp$ //

- \* - erro máximo para a escala total  
 \*\* - erro máximo em 100  $\mu\text{m}$   
 // - axial com o apalpador  
 $\perp$  - perpendicular ao eixo do apalpador  
 S - deslocamento linear  
 $\theta$  - deslocamento angular  
 L - indutância  
 $\phi$  - variação do fluxo luminoso  
 P - pressão

Tabela 3.1 - Comparação das características dos apalpadores atualmente utilizados.



#### 4 - DESENVOLVIMENTO DE UM APALPADOR COM GUIAS DE MOLAS PARALELAS

##### 4.1 - Definição do projeto

Para o projeto de um apalpador, duas importantes escolhas devem ser feitas, relativas ao primeiro estágio de um sistema de medição (fig. 1.1):

- O sistema de transmissão mecânica do sinal
- O sistema transdutor do sinal

A seleção dos sistemas deve ser baseada nas características desejadas para o apalpador. Para o apalpador objetivo deste trabalho, as principais características são:

- movimento retilíneo paralelo na direção de medição
- histerese mínima
- precisão de posicionamento
- força de medição pequena
- automatização utilizando sistemas eletrônicos associados comuns
- montagens opcionais em sistemas padrão "fixo" e 3D, através de um conjunto de peças intercambiáveis.

##### 4.2 - Sistema de transmissão mecânica do sinal

A figura 4.1 mostra alguns sistemas de guias atualmente utilizados em apalpadores eletrônicos [14].

Os sistemas a, b e c para aplicação em apalpadores 3D, apresentam a desvantagem de força de atrito elevada, quando sujeitos a forças perpendiculares à direção de medição. O sistema d, mola de flexão, não possui movimento paralelo e retilíneo e também é de difícil aplicação em um sistema de peças intercambiáveis. O sistema de molas paralelas apresenta algumas vantagens:

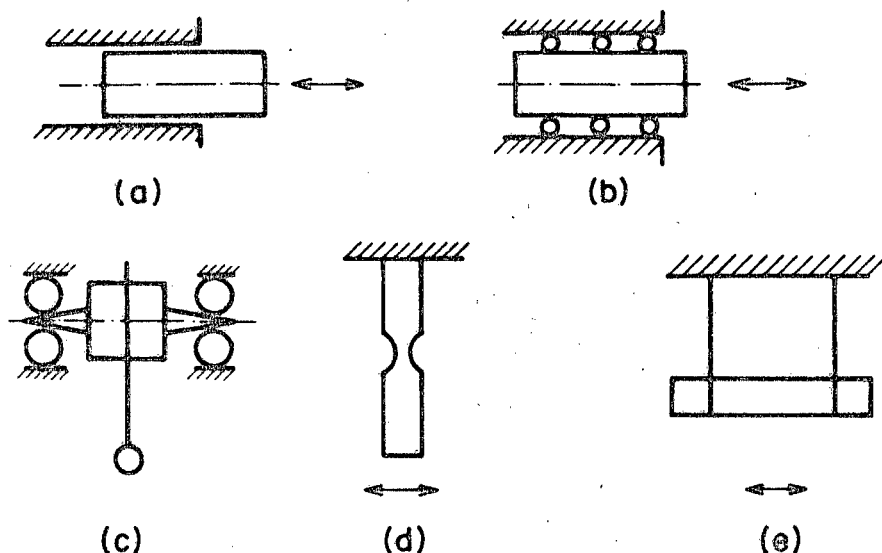


Fig. 4.1 - a) bucha deslizante; b) guia axial com esferas;  
c) guia transversal com esferas; d) mola de flexão;  
e) molas paralelas.

- minimiza os erros devido ao atrito,
- pode ser obtido movimento com pequenos desvios do paralelo retilíneo [15, 16],
- montagem através de um conjunto de peças intercambiáveis.

As principais desvantagens do sistema são:

- a força cresce com o curso,
- influência de forças perpendiculares à direção do movimento principal.

#### 4.2.1 - Sistemas de molas paralelas

Sistemas de molas paralelas são montados utilizando um conjunto de blocos intercambiáveis e 2, 4 ou outro número par de molas laminadas dimensionalmente iguais. Um grande número de arranjos com diferentes propriedades pode ser obtido deste modo. A referência [17] apresenta um sumário dos principais sistemas de molas laminadas, e estimativas de algumas de suas propriedades, baseado em extensa pesquisa bibliográfica. A fig. 4.2 [17]

mostra alguns sistemas selecionados que podem ser aplicados na construção de apalpadores 3D. Neste quadro pode-se observar:

- Desenho esquemático do sistema, com indicação da direção do movimento nominal  $x$ .
- Curva de movimento e limite de curso para o movimento especificado.
- Deflexões parasitas em relação a  $x$ .
  - deflexão  $y$
  - deflexão angular ( $\beta$ ) - no plano de movimento nominal
  - deflexão angular ( $\alpha$ ) - no plano normal ao movimento nominal
- Força na direção nominal  $F$ .
- Forças  $F_y$  e  $F_z$  em função da força nominal  $F$ .
- Grau de complexidade de fabricação (0 ... 0000).

Os sistemas foram classificados em dois grupos:

- Grupo 1 - Caracteriza-se principalmente por relativa simplicidade de fabricação; no entanto as propriedades para aplicação em apalpadores 3D são inferiores, como por exemplo:
  - movimento principal parabólico,
  - deflexões parasitas elevadas,
  - forças laterais  $F_y$  e  $F_z$  permissíveis, pequenas em relação à força nominal  $F_x$ .
- Grupo 2 - Sistemas mecanicamente mais complexos, mas com propriedades melhores para aplicação em apalpadores 3D. O sistema 5 apresenta excepcionais propriedades, como:
  - curso elevado em movimento paralelo e retilíneo ( $x/\ell < 0,4$ )
  - deflexões parasitas pequenas:  $y/x < 0,1\%$ ;  $\alpha < 5''$  e  $\beta < 5''$
  - forças laterais permissíveis elevadas:  $F_y < 10 F_x$  e  $F_z < 10 F_x$ .


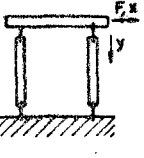
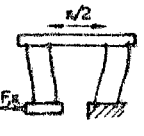
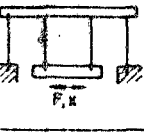
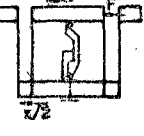
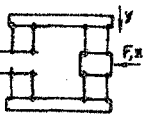
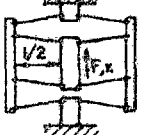
GRUPO I						
ESQUEMA	TIPO	CURVA	DESVIOS DA RETILINEARIDADE	FORÇA	FORÇA LATERAL	COMPLEXIBILIDADE DE CONSTRUÇÃO
	1	Parábola $y = \frac{3}{5} \frac{x^2}{\ell}$	Para $\frac{x}{\ell} < 0,2$ $\frac{y}{x} < 6\%$ $\alpha < 10'$ $\beta < 10'$	$F = \frac{24 E I x}{\ell^3}$	$\frac{x}{\ell} < 0,2$ $F_y \leq F$ $F_z \leq 4F$	00
	2	Parábola $y = \frac{3}{5} \frac{x}{\ell} \eta$ $\eta = 0,05 \dots 1$	para $\frac{x}{\ell} < 0,2$ $\frac{y}{x} < 5\%$ $\alpha < 2'$ $\beta < 2'$	$F = K \frac{24 E I x}{\ell^3}$ $K = 1 \dots 3$ $K = g$	$F_y \leq F$ $F_z \leq 5F$	00
GRUPO II						
	1	para $\frac{x}{\ell} < 0,4$ reta	$\frac{y}{x} < 1\%$ $\alpha < 1'$ $\beta < 1'$	$F = \frac{12 E I x}{\ell^3}$	$F_y < F$ $F_z < 0,5 F$	000
	2	para $\frac{x}{\ell} < 0,4$ reta	$\frac{y}{x} < 0,5\%$ $\alpha < 30''$ $\beta < 30''$	$F = \frac{12 E I x}{\ell^3}$	$F_y \leq F$ $F_z \leq F$	000
	3	para $\frac{x}{\ell} < 0,4$ reta	$\frac{y}{x} < 0,1\%$ $\alpha < 10''$ $\beta < 5''$	$F = \frac{12 E I x}{\ell^3}$	$F_y < F$ $F_z \leq 5F$	0000
	4	para $\frac{x}{\ell} < 0,4$ reta	$\frac{y}{x} < 0,1\%$ $\alpha < 10''$ $\beta < 5''$	$F = \frac{384 E I x}{\ell^3}$	$F_y \leq 5F$ $F_z \leq 5F$	0000
	5	para $\frac{x}{\ell} < 0,4$ reta	$\frac{y}{x} < 0,1\%$ $\alpha < 5''$ $\beta < 5''$	$F = \frac{384 E I x}{\ell^3}$	$F_y < 10F$ $F_z < 10F$	0000

Fig. 4.2 - Sistemas de molas laminadas paralelas e suas principais características [17].

### 4.3 - Projeto do apalpador

Para o modelo do apalpador deste trabalho foram escolhidos:

- a) transmissão: sistema de molas paralelas, número 5, grupo II da figura 4.2.
- b) transdução: sistema eletrônico indutivo - indutância variável

Além da construção básica, outra importante etapa do projeto é a escolha da proporção geométrica dos blocos e molas. Como não existe na literatura definição objetiva das características do movimento em função da proporção geométrica, o sistema foi projetado para permitir testes com uma grande gama de relações  $h/b$  ( $h$  - espessura da mola,  $b$  - largura da mola) e  $x/\ell$  ( $x$  - curso,  $\ell$  - comprimento da mola).

A figura 4.3a mostra a perspectiva do apalpador projetado e a orientação dos eixos coordenados que será adotado neste trabalho. O bloco móvel principal foi projetado de modo a permitir conexão de pontas apalpadoras nas três direções coordenadas, figura 4.3b e acoplamento com o bloco móvel principal de mais dois elementos, formando assim um apalpador 3D, figura 4.3c. A figura 4.4a mostra o desenho técnico do apalpador construído que pode ser facilmente montado em outras opções como mostram as figuras 4.4b e 4.4c.

Os limites dimensionais para as molas são:

Dimensões das molas	Sistema 4 molas	Sistema 2 molas
Comprimento ( $\ell$ )	$\leq 15$ mm	$\leq 7,5$ mm
Largura ( $b$ )	$\leq 30$ mm	$\leq 30$ mm

A figura 4.5 mostra o conjunto de peças intercambiáveis para montagem de um elemento 3D, alguns tipos de pontas e peças de acoplamentos entre os elementos.

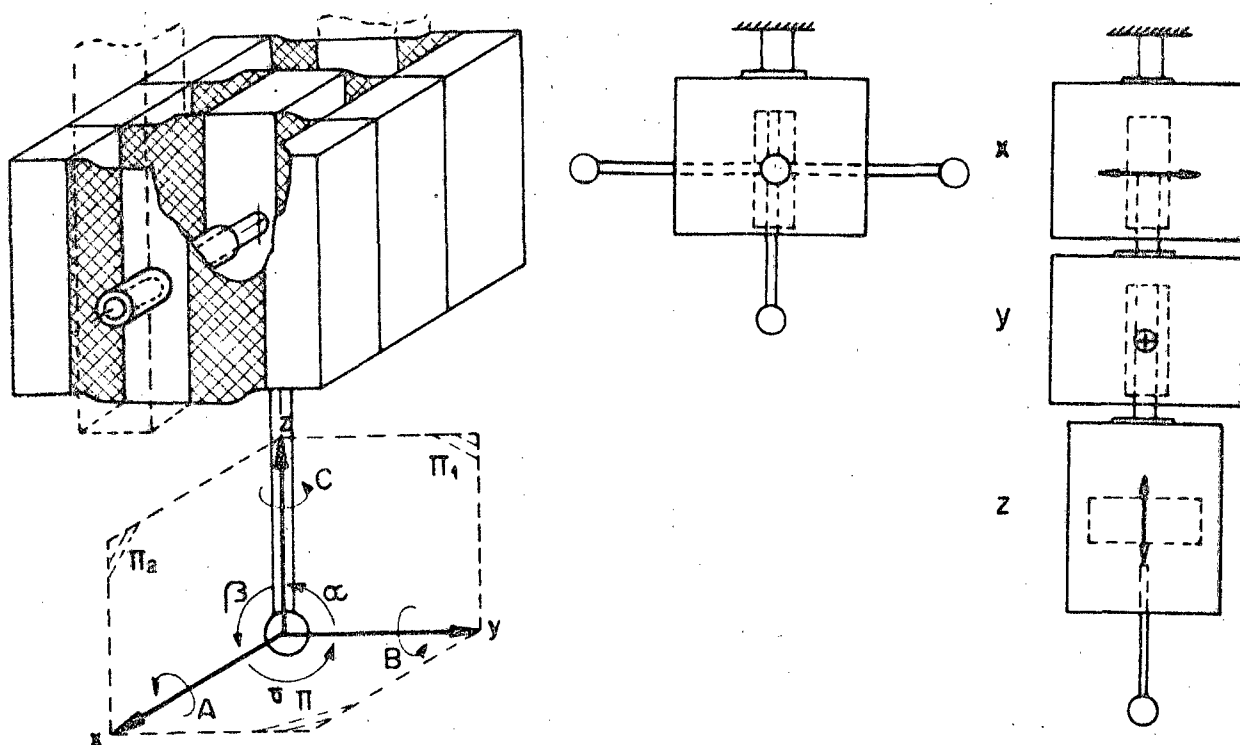


Fig. 4.3 - a) perspectiva de um elemento do apalpador. b) um elemento do apalpador com pontas nas direções x, y e z. c) um elemento x, um elemento y e um elemento z, montados em 3D.

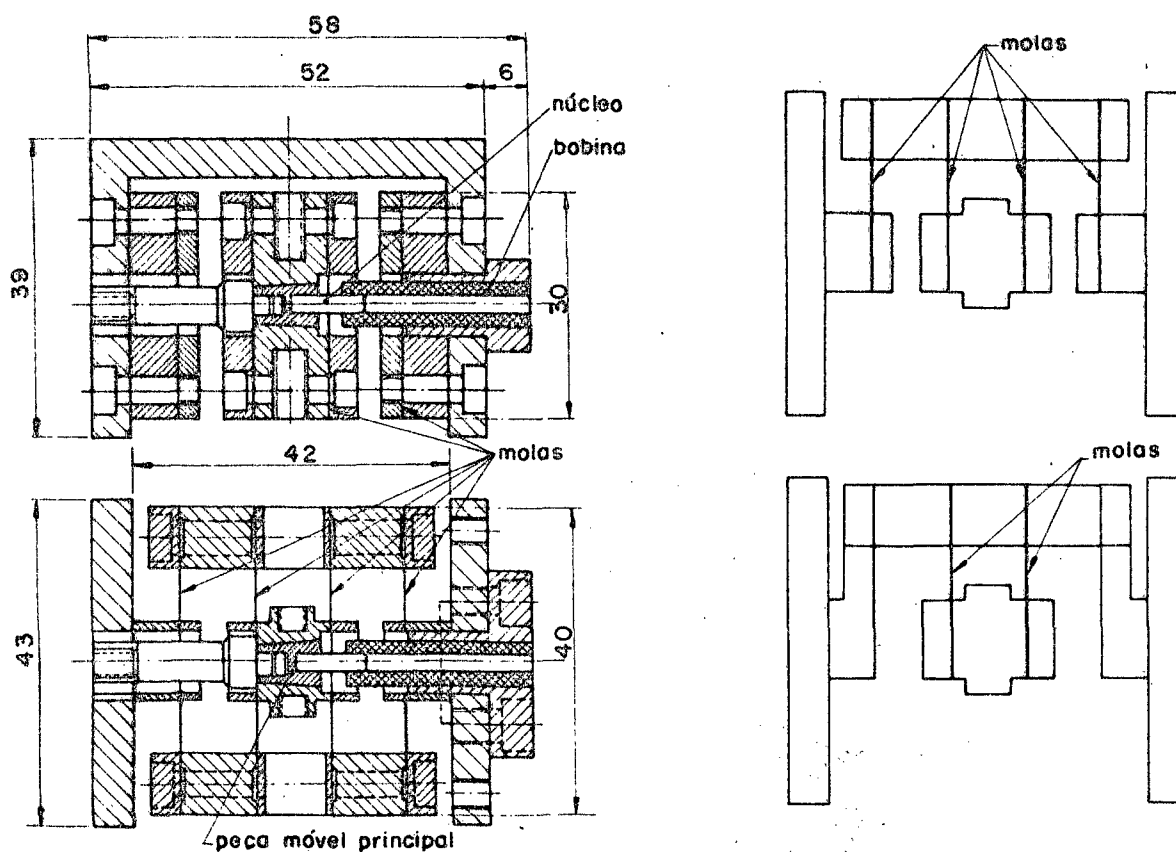


Fig. 4.4 - a) projeto do apalpador; b) opção de montagem; c) opção de montagem.

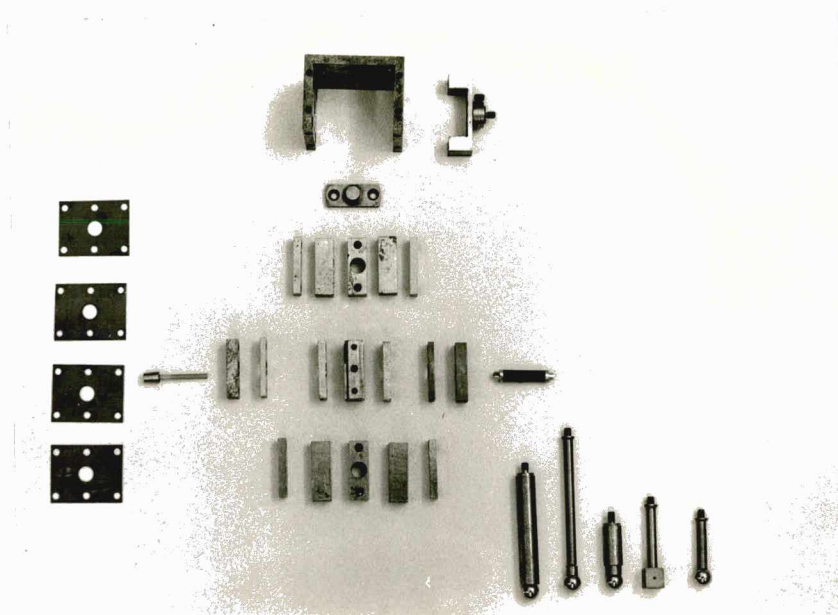


Fig. 4.5 - Conjunto de peças intercambiáveis para um elemento 3D

## 5. PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIOS COM APALPADORES

Os ensaios tiveram como objetivo mostrar os deslocamentos da ponta do apalpador, em três coordenadas, quando sujeita à atuação de forças nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e momentos com eixos em  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Para a aplicação e medição de forças e deslocamentos nas três direções, foram projetados três dispositivos do tipo mostrado na figura 5.1.

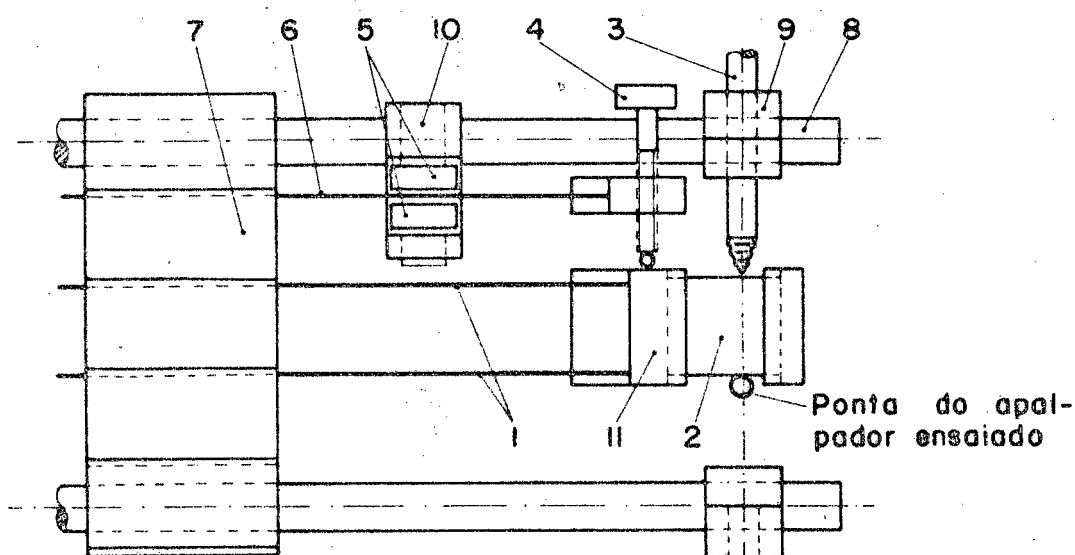


Fig. 5.1 - Dispositivo para ensaios com apalpadores

As exigências básicas para este dispositivo foram:

1. Estabelecer um contato efetivo e definido com a ponta do apalpador,
2. Gerar um movimento retilíneo
3. Aplicar forças e deslocamentos.

- Descrição do dispositivo (figura 5.1):

### 5.1 - Parte mecânica

a) guias para um movimento definido da ponta do apalpador na direção nominal  $x$ ; b) guia auxiliar para medir deslocamentos  $x$ ,  $y$  e  $z$  quando atuam forças ou momentos nas direções  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .



As guias são as molas paralelas (1).

Na extremidade das molas paralelas foi montado um bloco padrão (2), contactando de um lado com a ponta esférica do apalpador, e do outro com um apalpador indutivo (3) usual para medir deslocamentos. As forças foram aplicadas através do avanço de um parafuso (4), acoplado à extremidade de uma mola de flexão. A deflexão da mola serviu para medir a força através dos apalpadores indutivos sem contato (5). As molas paralelas e a mola de flexão foram engastadas em um conjunto de 5 blocos intercambiáveis permitindo várias opções de montagem, variando a distância entre molas e os comprimentos das molas.

A montagem dos três dispositivos nas três direções coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  é mostrada na figura 5.2.

Os momentos foram aplicados por alavanca, com eixo de rotação acoplado ao centro geométrico do apalpador, e carregamento com pesos calibrados.

Para minimizar os efeitos devidos à deflexão estrutural do banco de ensaios foram utilizados apalpadores indutivos para compensação nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ; na figura 5.2 é mostrado o posicionamento do apalpador de compensação na direção  $y$ .

## 5.2 - Parte elétrica

A figura 5.3 mostra esquematicamente a ligação elétrica do dispositivo:

- os sinais dos apalpadores indutivos, referência (3) e compensação (4), são somados em amplificadores de frequência portadora (1), independentes para cada direção  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

- cada elemento do apalpador 3D (9) pode estar ligado, através de chave seletora (8), a um mesmo amplificador de frequência portadora (1).

- os apalpadores indutivos sem contato (5)  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , estão ligados ao mesmo amplificador de frequência portadora (2), através de chave seletora (8).

o sensor de temperatura (7) está ligado a um amplificador (6).

### 5.3 - Automatização

Os ensaios foram feitos utilizando um Sistema de Aquisição de Sinais (SAS) [23, 24]. Na figura 5.4, estão esquematizados os componentes do SAS utilizado, formado por uma chave seletora (SC), um voltímetro do sistema (SVM) e um computador (HP-9825) que passa a ser nesta configuração, a unidade central do sistema, sendo interligado aos outros componentes pelo BUS padronizado IEEE 488 (HP-1B). A periferia para saída de informações é constituída por um plotador e uma impressora.

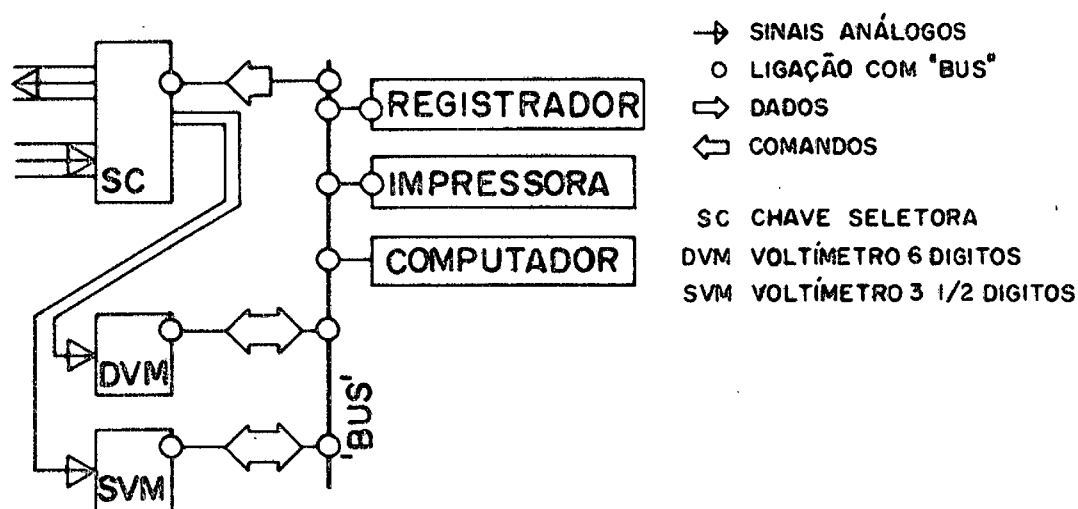


Fig. 5.4 - Sistema de Aquisição de Sinais (SAS).

### 5.4 - Calibração

Os apalpadores indutivos (3 - figura 5.1 e 5.3) foram calibrados utilizando como padrão um apalpador eletro-ótico Heidenhain MT-30 com erro máximo de  $\pm 0,2 \mu\text{m}$ , conforme a curva de calibração da fábrica. A calibração foi feita nas escalas  $\pm 2000 \mu\text{m}$ ,  $\pm 200 \mu\text{m}$  e  $\pm 20 \mu\text{m}$ . A figura 5.5 mostra um exemplo das curvas de calibração para carregamento e descarregamento. Cada ponto representa a média de 5 leituras. As retas foram calculadas pelo método dos mínimos quadrados e as curvas representam o intervalo de confiança para valores individuais da escala.

Para a calibração dos sistemas para medição de força (5 - figuras 5.1 e 5.3) foram utilizados pesos calibrados. A cali

bração foi feita nas escalas 1000 mN, 2000 mN e 5000 mN. A figura 5.6 mostra um exemplo da curva de calibração, que segue a mesma sistemática da calibração de deslocamentos.

Da listagem da impressora foram obtidas as equações da regressão linear com os parâmetros  $b$  (inclinação) e  $a$  (ordenada na origem), os intervalos de confiança  $\Delta b$  e  $\Delta a$  para os parâmetros  $b$  e  $a$ , respectivamente, os coeficientes de correlação e o valor máximo da histerese. As equações foram obtidas para o carregamento e descarregamento e são do tipo

$$\Delta x_{(\mu m)} = (b \pm \Delta b) \cdot x_{(\mu m)} + (a \pm \Delta a)_{(\mu m)}$$

$$\Delta F_{(mN)} = (b \pm \Delta b) \cdot F_{(mN)} + (a \pm \Delta a)_{(mN)}$$

$\Delta x$  - diferença entre os deslocamentos do sistema e de referência

$\Delta F$  - diferença entre as forças do sistema e da referência.

Os parâmetros  $b$  médios das equações da calibração foram usados para correção dos valores lidos nos testes. Os valores pequenos dos coeficientes de correlação são devidos à regressão linear ter sido feita para as diferenças (sistema ensaiado - referência), de natureza aleatória.

## 5.5 - Regulagem e alinhamento dos dispositivos

Nas experiências com aplicação de força em uma direção, o contato com os blocos padrão (2 - figura 5.1) nas outras duas direções foi mantido com força  $<10$  mN. Na aplicação dos momentos, o contato nas três direções foi mantido com a mesma força. O paralelismo de movimento das guias foi de  $\pm 1 \mu m/2000 \mu m$  para a direção  $y$  em relação à direção  $x$  e  $\pm 2 \mu m/2000 \mu m$  para a direção  $z$  em relação à direção  $x$ . No alinhamento dos blocos, o erro máximo foi de  $1 \text{ mm/m}$ .

Na montagem dos apalpadores no dispositivo, foram aplicados deslocamentos na direção nominal  $x$  e realizado o alinhamento em relação aos blocos das guias  $y$  e  $z$ . O erro foi  $<1\%$  do curso.

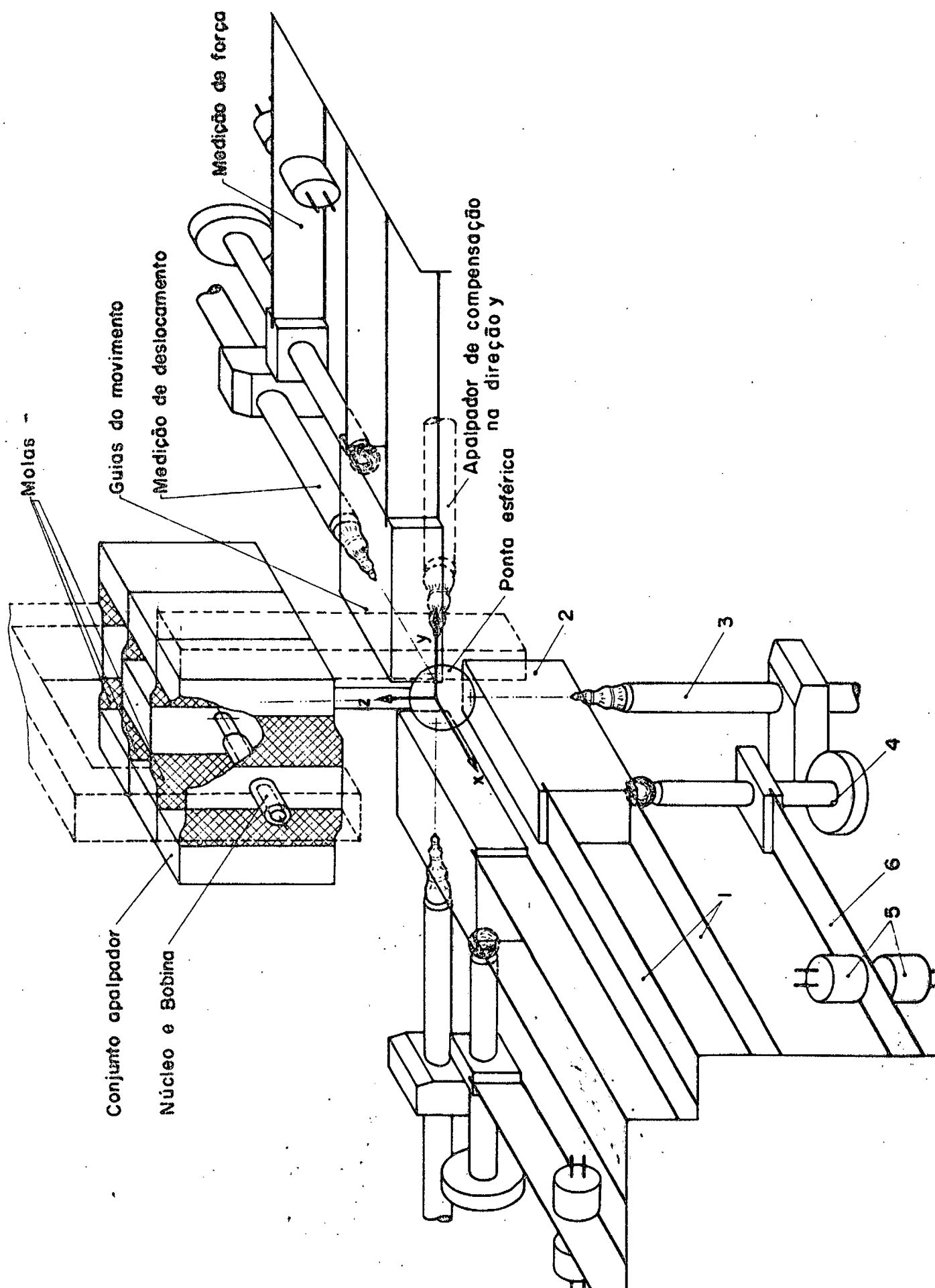


Fig. 5.2 - Montagem dos três (3) dispositivos de testes nas três (3) direções coordenadas.



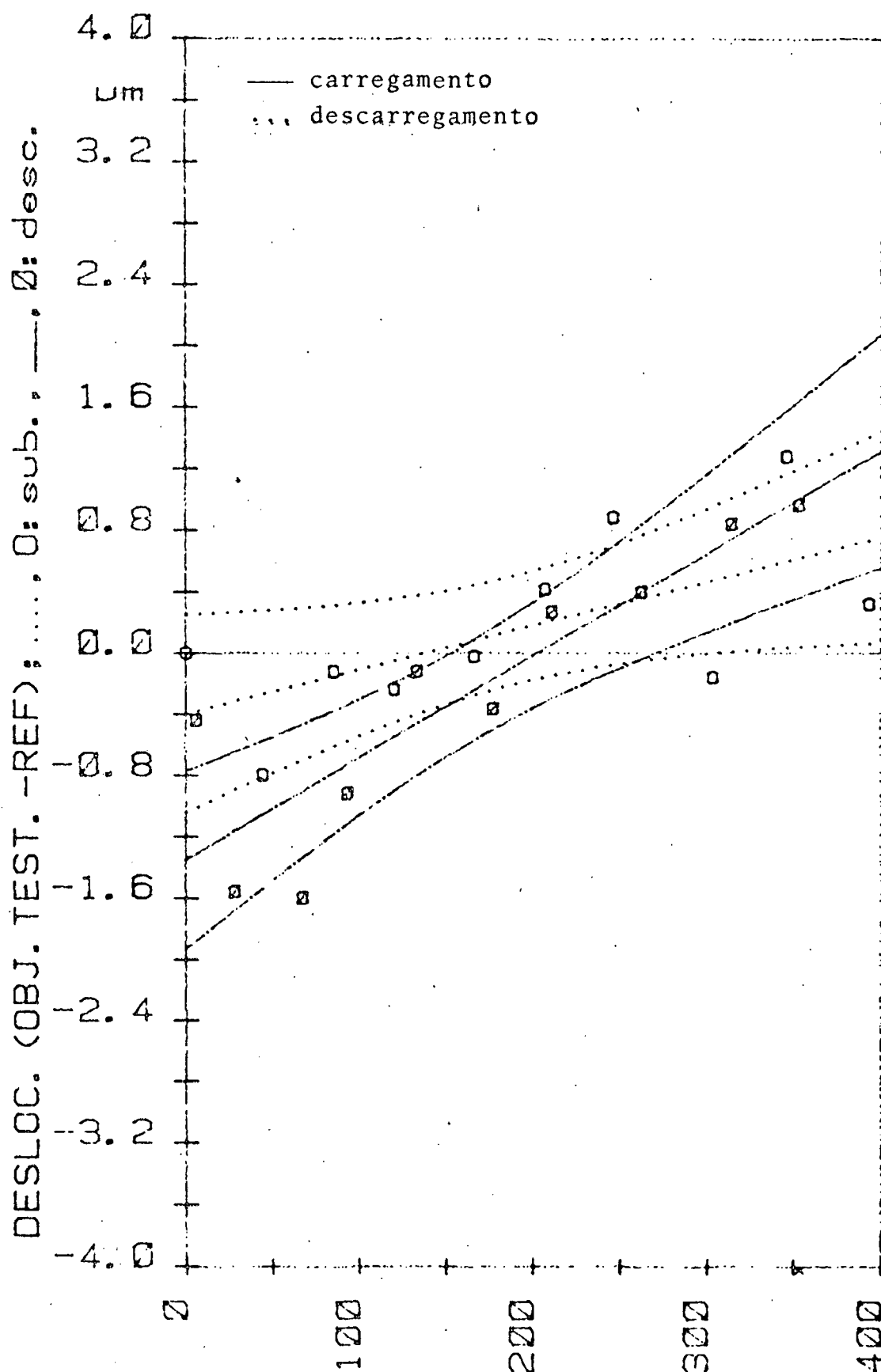


Fig. 5.5 - Calibração de um apalpador indutivo referência, para medição de deslocamentos, na escala  $\pm 200 \mu\text{m}$

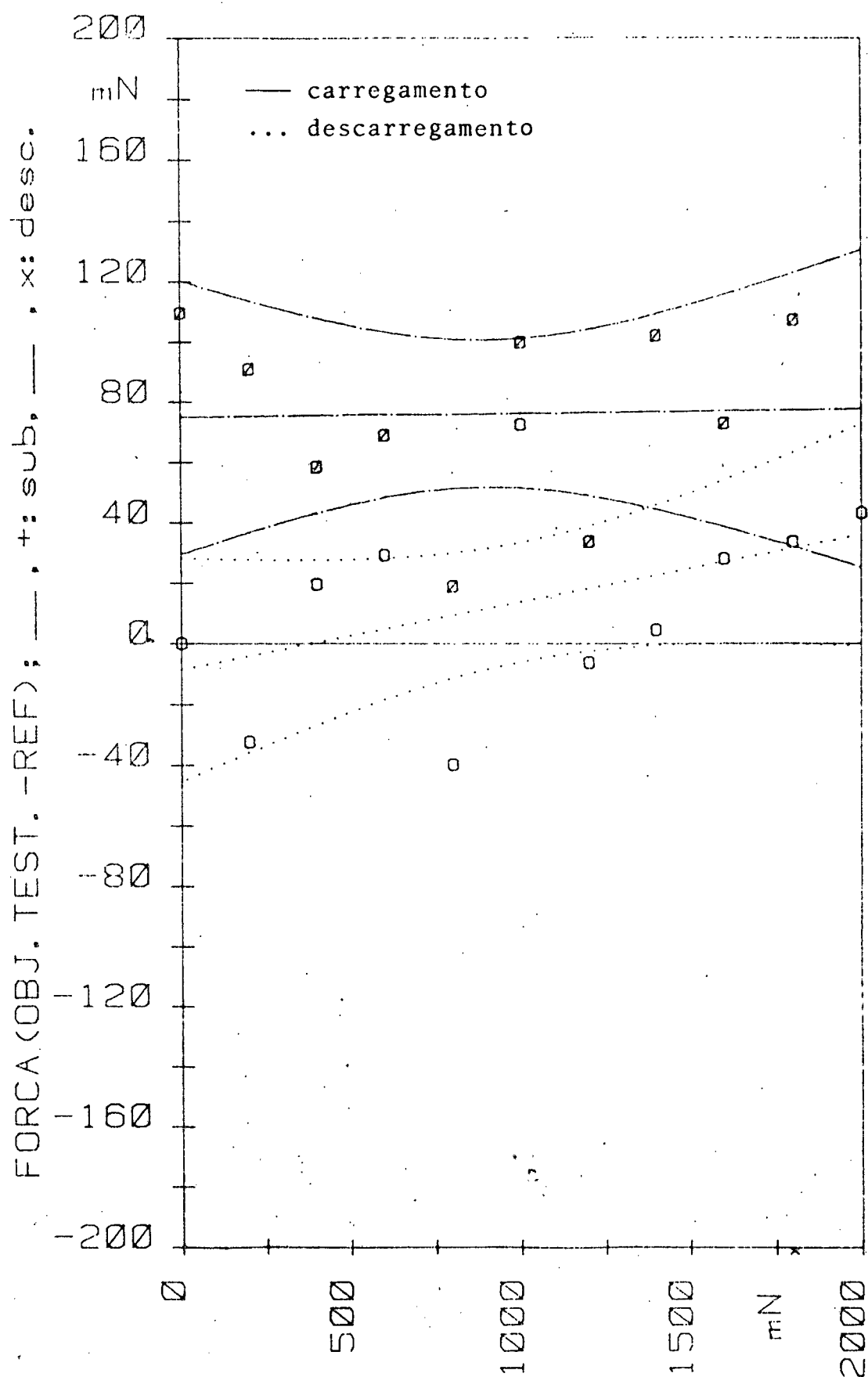


Fig. 5.6 - Calibração de um apalpador indutivo sem contato, para medir indiretamente forças, na escala 2000 mN.

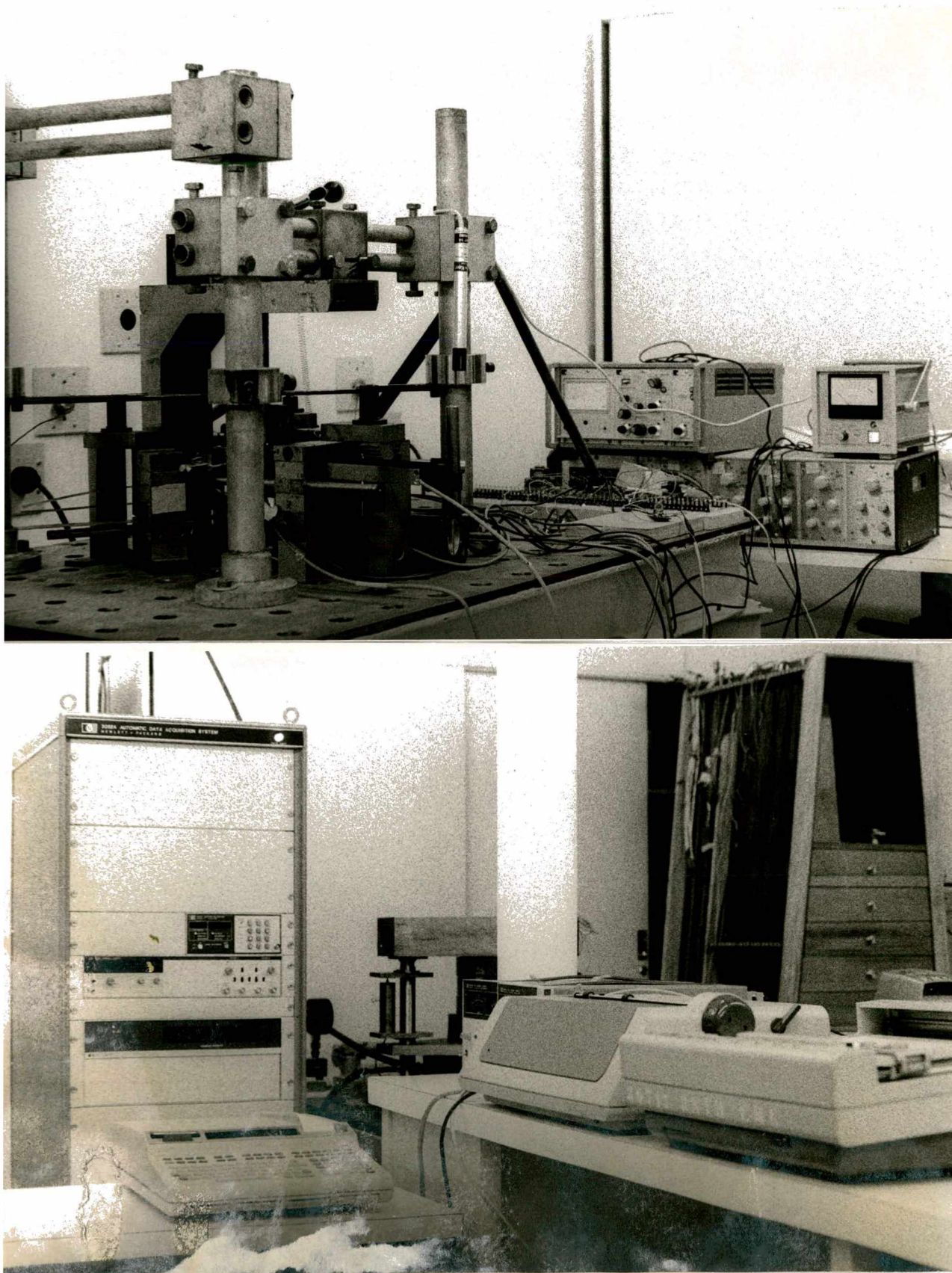


Fig. 5.7 - Conjunto do banco de ensaios.



## 6. ENSAIOS REALIZADOS

### 6.1 - Ensaaios com apalpadores

Os apalpadores ensaiados utilizaram molas com comprimento  $\ell = 14$  mm, largura  $b = 30$  mm e espessura de 0,03, 0,05 e 0,10 mm.

Os ensaios feitos em cada apalpador foram:

#### 1. Deslocamento na direção nominal x.

Dados obtidos:

$X_a - X = f(x)$  - diferença entre o deslocamento da ponta do apalpador e sua leitura.

$Y = f(x)$  - deflexão parasita na direção y

$Z = f(x)$  - deflexão parasita na direção z

$F = f(x)$  - força na direção nominal x.

#### 2. Aplicação de forças nas direções y e z e momentos com eixos em x, y e z.

Dados obtidos:

$X_a^*$ ,  $X^*$  - erro de medição na direção x devido à aplicação de força ou momento.

$Y^*$ ,  $Z^*$  - erro de posição nas direções y e z da ponta do apalpador devido à aplicação de força ou momento.

As figuras 6.1, 6.2 e 6.3, mostram três exemplos representativos dos resultados.

Na figura 6.1 foram registradas as características do apalpador, com molas de 0,03 mm, para um deslocamento na direção nominal (direção x). Os pontos "+" e "x" representam, respectivamente, as forças para o carregamento e descarregamento. Os pontos assinalados por círculos e quadrados, são o erro ( $X_a - X$ ) e as deflexões parasitas do apalpador para deslocamento na direção x. As

retas foram calculadas pelo método dos mínimos quadrados.

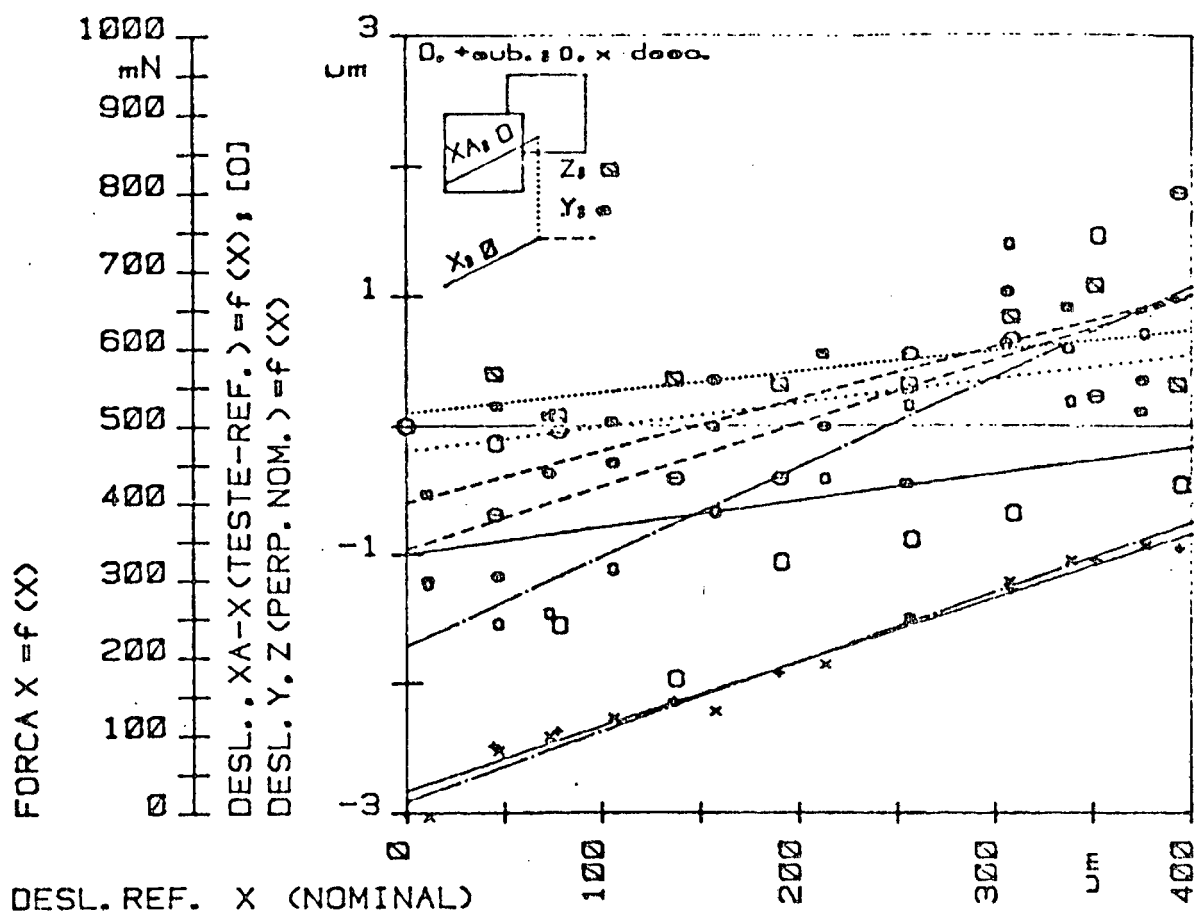


Fig. 6.1 - Características do apalpador (molas 0,03 mm) para deslocamento na direção nominal x.

Convenção para as figuras 6.1, 6.2 e 6.3

—  $(X_a - X)$ ,  $X_a^*$ ,  $X^*$  e  $F$

----  $Y$  e  $Y^*$

....  $Z$  e  $Z^*$

+ e x -  $F = f(x)$ , carregamento e descarregamento

□ e ◻ -  $(X_a - X)$ ,  $X_a$ ,  $X_a^*$  e  $X^*$ , carregamento e descarregamento

○ e ◉ -  $X$ , carregamento e descarregamento

△ e ▴ -  $Y$  e  $Y^*$ , carregamento e descarregamento

◇ e ▤ -  $Z$  e  $Z^*$ , carregamento e descarregamento

As figuras 6.2 e 6.3 mostram as deflexões do mesmo apalpador, quando sujeito a forças na direção y e a momentos com eixo em x, respectivamente.

A tabela 6.2 relaciona os ensaios feitos.

As equações relacionadas são as que apresentaram coeficiente  $b$  (inclinação) mais próximo do coeficiente  $b$  médio das retas obtidas para cada ensaio. As equações são do tipo:

- Para o erro na direção de medição  $x$

$$(X_a - X)_{(\mu m)} = (b \pm \Delta b) \cdot \text{deslocamento}_{(\mu m)} + (a \pm \Delta a)_{(\mu m)}$$

- Para deflexões parasitas nas direções  $y$  e  $z$

$$Y, Z_{(\mu m)} = (b \pm \Delta b) \cdot \text{deslocamento}_{(\mu m)} + (a \pm \Delta a)_{(\mu m)}$$

- Para a força na direção nominal  $x$

$$F_{(mN)} = (b \pm \Delta b) \cdot \text{deslocamento}_{(\mu m)} + (a \pm \Delta a)_{(\mu m)}$$

- Para os erros de medição devidos à aplicação de forças ou momentos

$$X_a^*, X_{(\mu m)}^* = (b \pm \Delta b) \cdot (F \text{ ou } M)_{(mN \text{ ou } N.mm)} + (a \pm \Delta a)_{(mN \text{ ou } N.mm)}$$

- Para os erros de posição devidos à aplicação de forças ou momentos

$$Y^*, Z_{(\mu m)}^* = (b \pm \Delta b) \cdot (F \text{ ou } M)_{(mN \text{ ou } N.mm)} + (a \pm \Delta a)_{(mN \text{ ou } N.mm)}$$

Os intervalos de confiança ( $\Delta b$  e  $\Delta a$ ) foram calculados a nível de 95%.

## 6.2 - Ensaio complementares com sistemas de duas molas paralelas

Nos apalpadores ensaiados o comprimento  $\ell'$  da mola, foi mantido constante. Para verificação do efeito da variação  $\ell/h$  (comprimento/espessura de mola) sobre a força, foram feitos ensaios com sistemas de duas molas paralelas. A figura 6.4 mostra a montagem de dois dispositivos para esta experiência.

Nos ensaios foram utilizadas molas com espessuras de

0,2, 0,4 e 0,8 mm e largura de 20 mm e relação  $\ell/h$  conforme a tabela 6.1.

Tab. 6.1 - Ensaio realizados com sistemas de duas molas paralelas

$\ell/h$	500	400	350	300	250	200	175	150	125	100	87,5	75	62,5	50
h														
0,2	x	x			x	x		x		x				x
0,4		x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	
0,8					x	x	x	x	x	x		x		

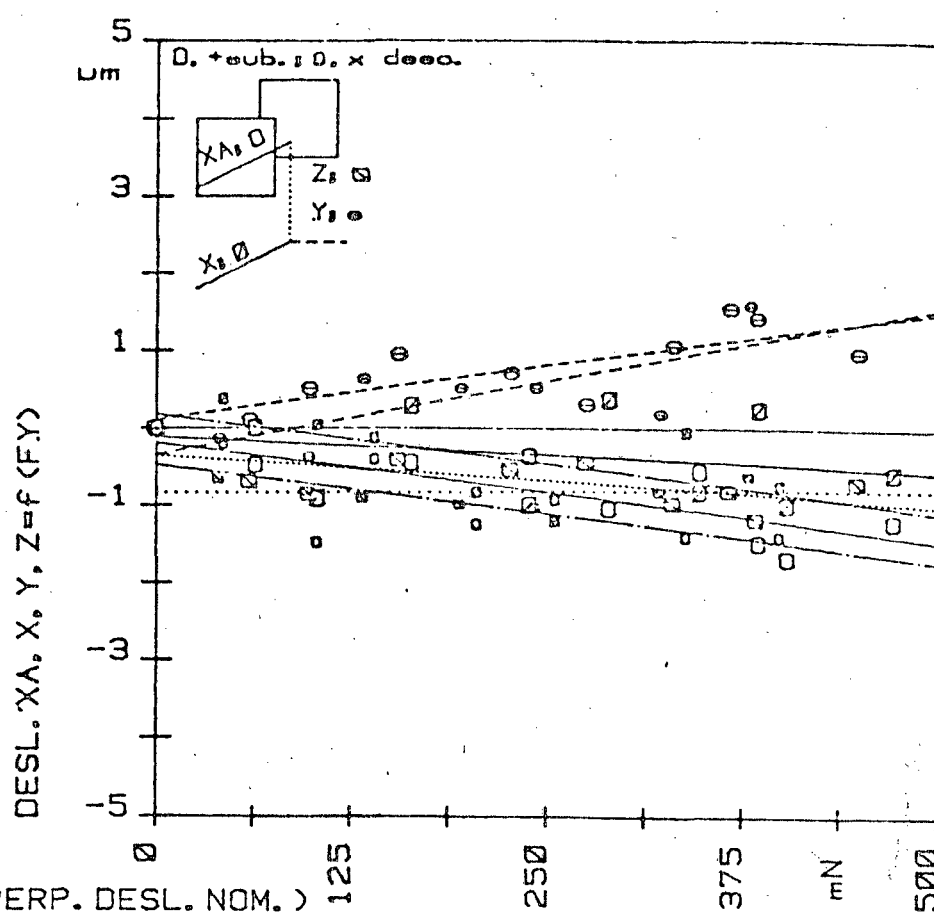


Fig. 6.2 - Deflexões do apalpador (molas 0,03 mm) devidas à aplicação de forças na direção y. Válida a mesma convenção da figura 6.1.

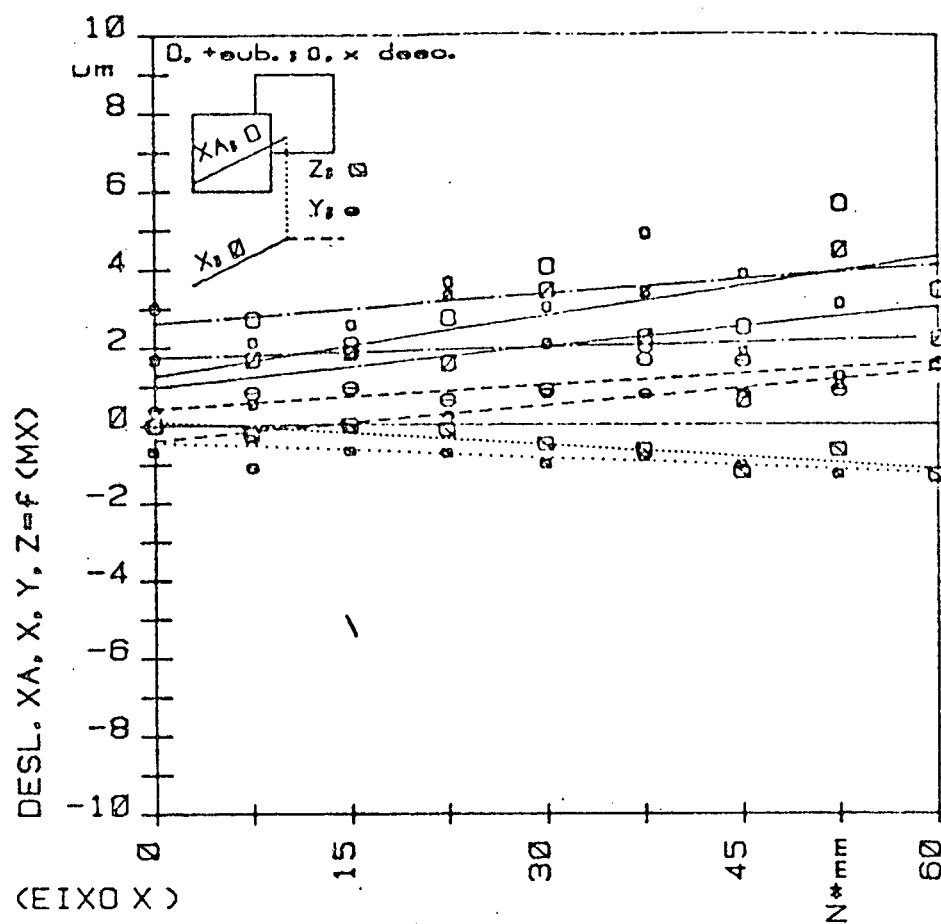


Fig. 6.3 - Deflexões do apalpador (molas 0,03 mm) devidas à aplicação de momento com eixo em x. Válida a mesma convenção da figura 6.1.

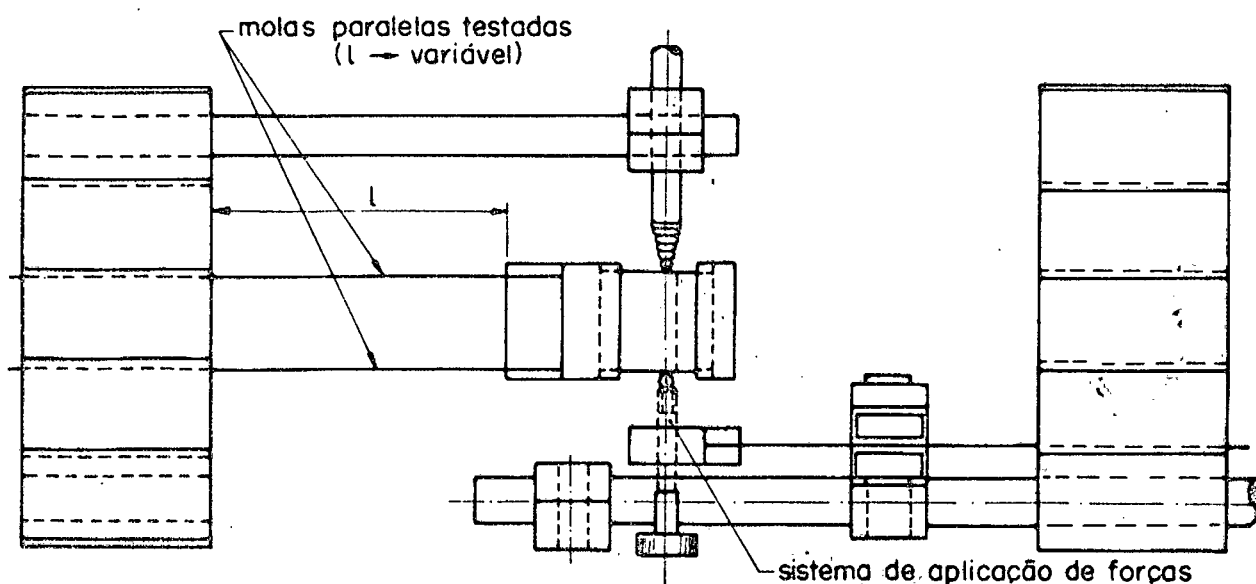


Fig. 6.4 - Montagem para ensaios força x deslocamento com sistema de duas molas paralelas.

T E S T E		Espessura da mola		
		0,03 mm	0,05 mm	0,10 mm
Deslocamento	400 m	x	x	x
	2000 m	x	x	
Força y	500 mN	x		
	2000 mN	x	x	
	5000 mN		x	
	10000 mN			x
Força z	500 mN	x		
	2000 mN	x	x	
	5000 mN		x	
	10000 mN			x
Momento x	60 Nmm	x		
	120 Nmm	x	x	
	300 Nmm		x	
	500 Nmm		x	x
Momento y	60 Nmm	x		
	120 Nmm	x	x	
	300 Nmm		x	
	500 Nmm		x	x
Momento z	60 Nmm	x		
	120 Nmm	x	x	
	300 Nmm		x	
	500 Nmm		x	x

Tabela 6.2 - Ensaios realizados com os apalpadores.

Dos ensaios foram obtidas as equações calculadas pelo método dos mínimos quadrados, os intervalos de confiança das constantes e os coeficientes de correlação. As equações do deslocamento na direção x em função da força aplicada são do tipo:

$$x_{(\mu\text{m})} = (b \pm \Delta b) \cdot F_{(\text{mN})} + (a \pm \Delta a)_{(\mu\text{m})}$$

Os intervalos de confiança  $\Delta b$  e  $\Delta a$  dos parâmetros da re  
ta,  $b$  e  $a$ , foram calculados a nível de 95%.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 - Resultados dos ensaios com apalpadores

#### 7.1.1 - Força de medição na direção nominal x

Os apalpadores ensaiados apresentaram as seguintes forças médias:

Espessura da mola (mm)	F/x (mN/ $\mu$ m) média
0,03	1,05
0,05	5,21
0,10	35,51

A figura 7.1 mostra graficamente estes resultados.

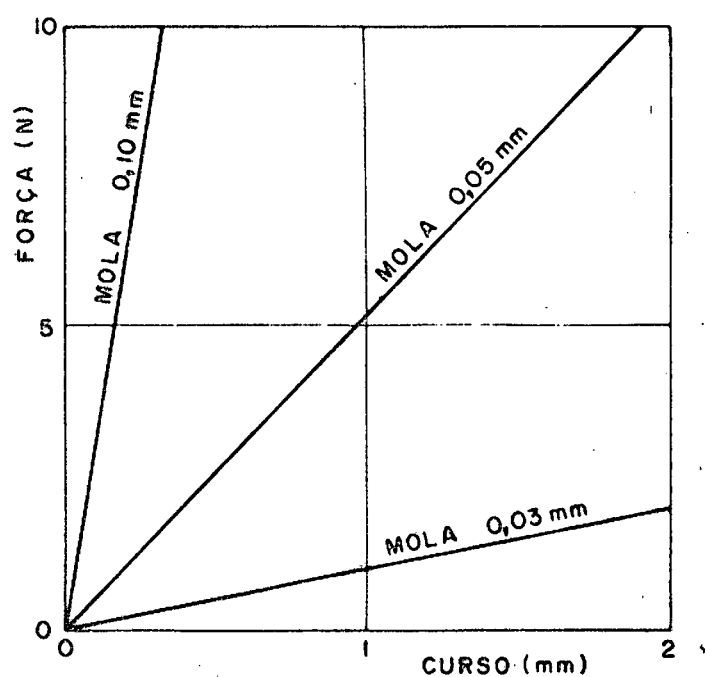


Fig. 7.1 - Força de medição.



### 7.1.2 - Erros na direção de medição e erros de posição dos apalpadores.

Utilizando as equações citadas no capítulo 6, foram calculados os limites dos erros dos apalpadores. Os limites superiores e inferiores foram calculados com as inclinações  $b+\Delta b$  e  $b-\Delta b$ , respectivamente. As figuras a seguir mostram estes resultados graficamente. Os traços horizontais representam os limites superiores e inferiores dos erros. A primeira e segunda coluna de cada erro representam os sentidos de carregamento e descarregamento, respectivamente.

- Figura 7.2 - Erros de medição ( $X_a - X$ ) e deflexões parciais ( $Y$  e  $Z$ ) nas direções  $y$  e  $z$  para os apalpadores com molas 0,03, 0,05 e 0,10 mm, para um deslocamento na direção nominal  $x$ .
- Figura 7.3 - Erros de medição na direção nominal  $x$  ( $X_a^*$ ,  $X^*$ ) e erros de posição ( $Y^*$ ,  $Z^*$ ) para o apalpador com mola 0,03 mm quando sujeito à atuação de forças na direção  $y$  e  $z$  e momentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .
- Figuras 7.4 e 7.5 - Erros de medição na direção nominal  $x$  ( $X_a^*$ ,  $X^*$ ) e erros de posição ( $Y^*$ ,  $Z^*$ ) para o apalpador com mola 0,05 mm, quando sujeito à atuação de forças na direção  $y$  e  $z$  e momentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .
- Figura 7.6 - Erros de medição na direção nominal  $x$  ( $X_a^*$ ,  $X^*$ ) e erros de posição ( $Y^*$ ,  $Z^*$ ) para o apalpador com mola 0,10 mm, quando sujeito à atuação de forças na direção  $y$  e  $z$  e momentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

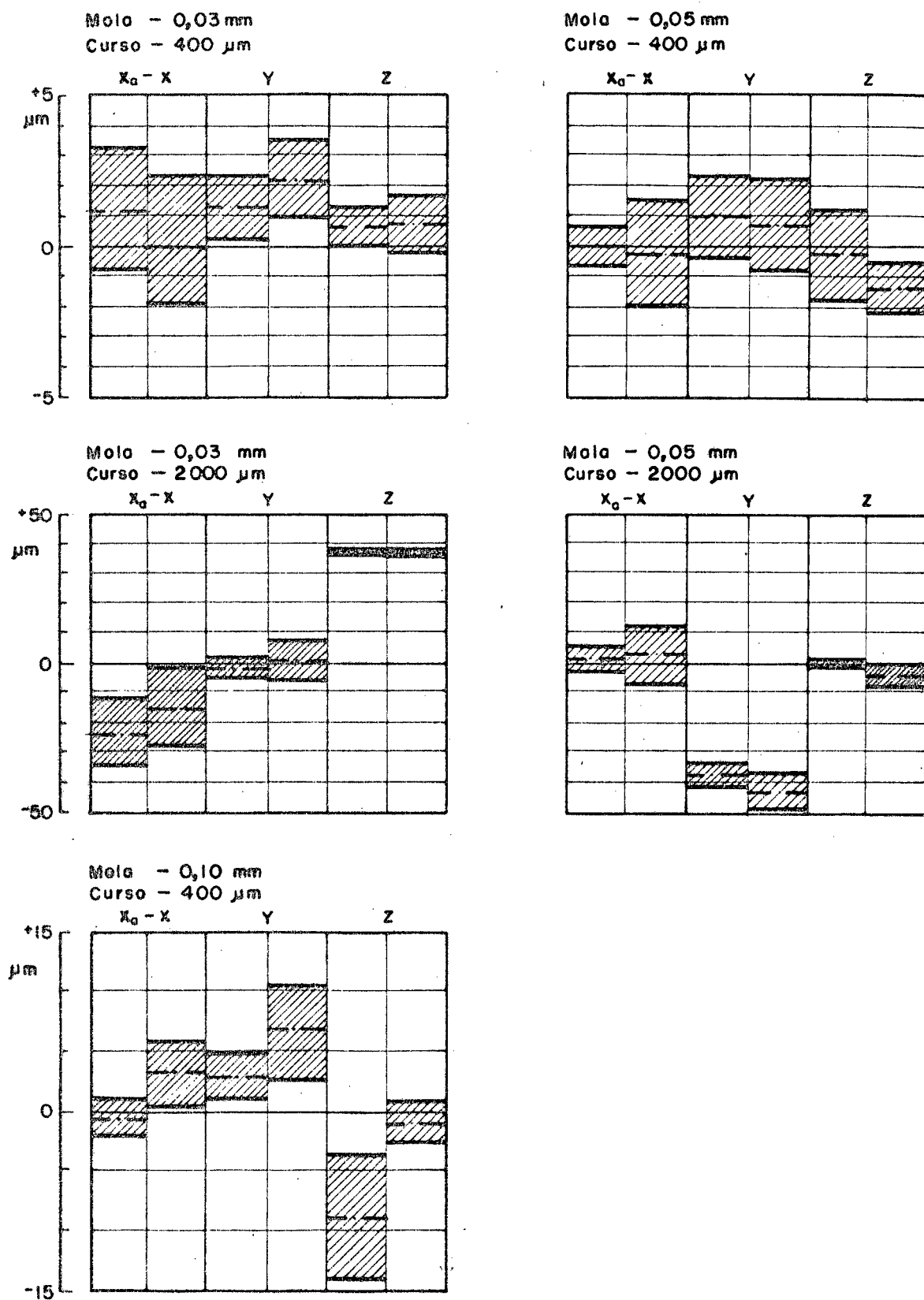


Fig. 7.2 - Erro da direção de medição ( $X_a - X$ ) e as deflexões parasitas ( $Y$  e  $Z$ ) nas direções  $y$  e  $z$ .

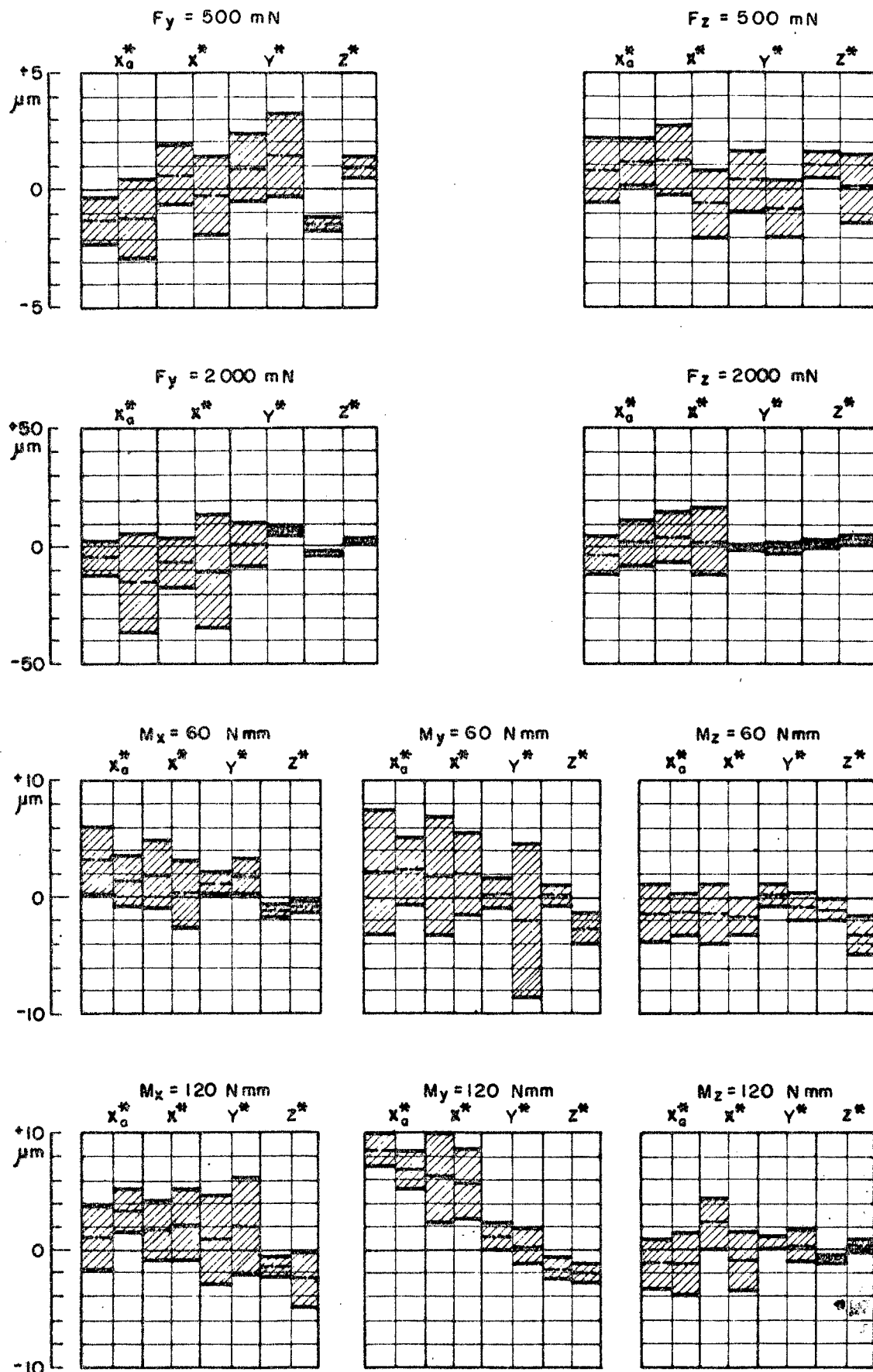


Fig. 7.3 - Erro na direção de medição ( $X_a^*$ ,  $X^*$ ) e erro de posição ( $Y^*$ ,  $Z^*$ ) devido as forças  $F_y$  e  $F_z$  e aos momentos  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$  no apalpador com espessura de mola  $0,03 \text{ mm}$ .

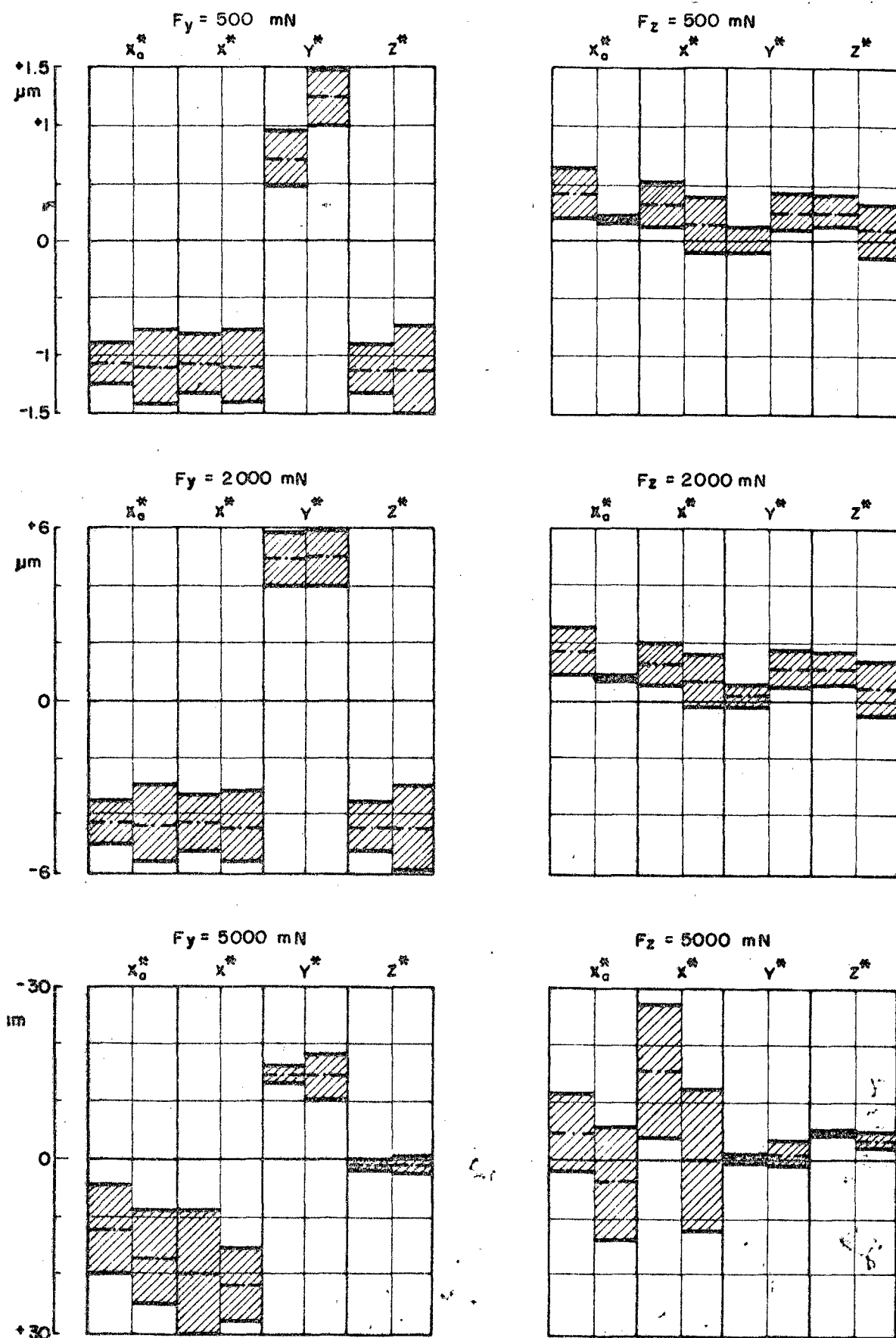


Fig. 7.4 - Erro na direção de medição ( $X_a^*$ ,  $X^*$ ) e erro de posição ( $Y^*$ ,  $Z^*$ ) devido às forças  $F_y$  e  $F_z$  no apalpador com es-  
surra de mola 0,05 mm.

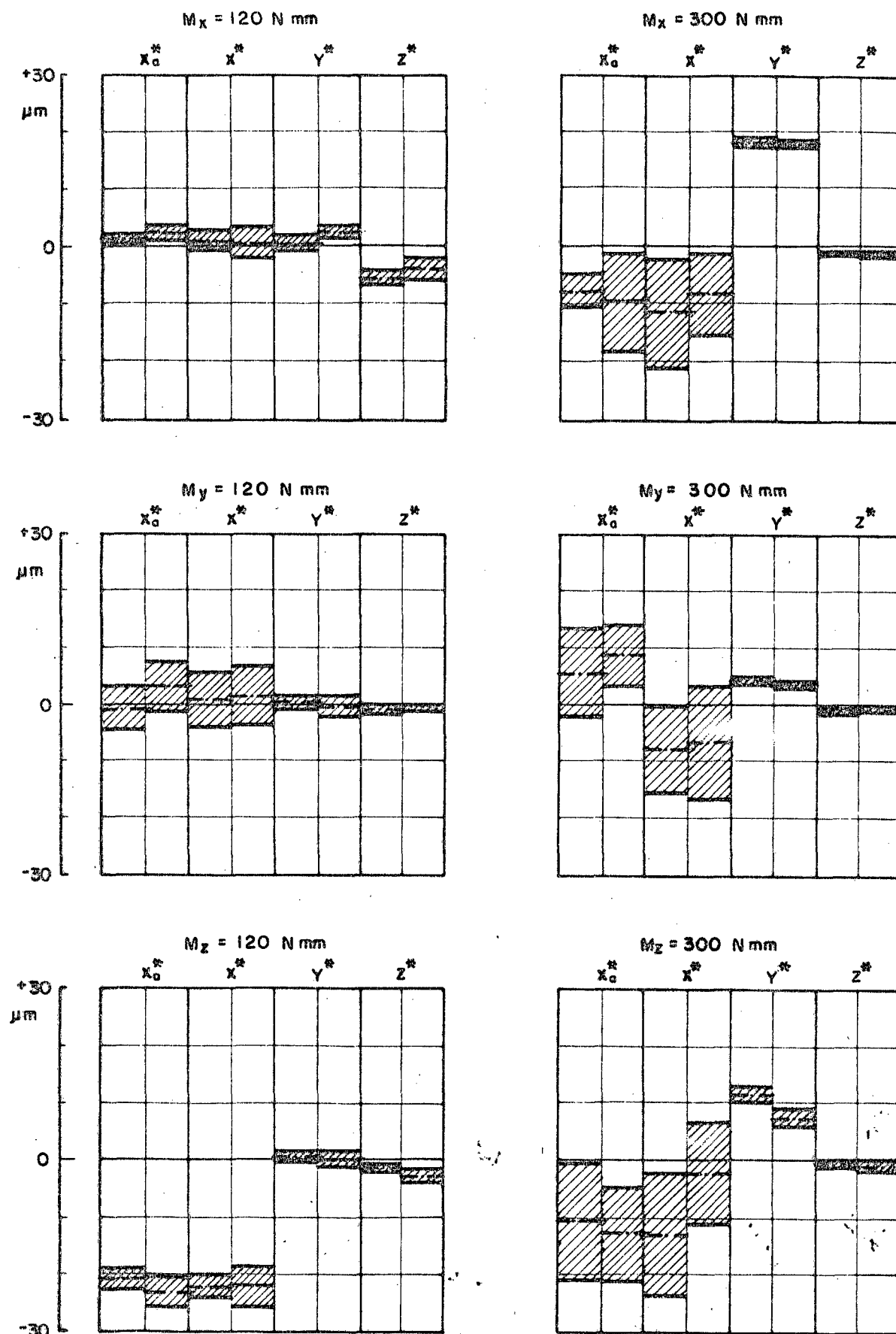


Fig. 7.5 - Erro na direção de medição ( $X^*$ ,  $X^*$ ) e erro de posição ( $Y^*$ ,  $Z^*$ ) devido aos momentos  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$  no apalpador com espessura de mola 0,05 mm.

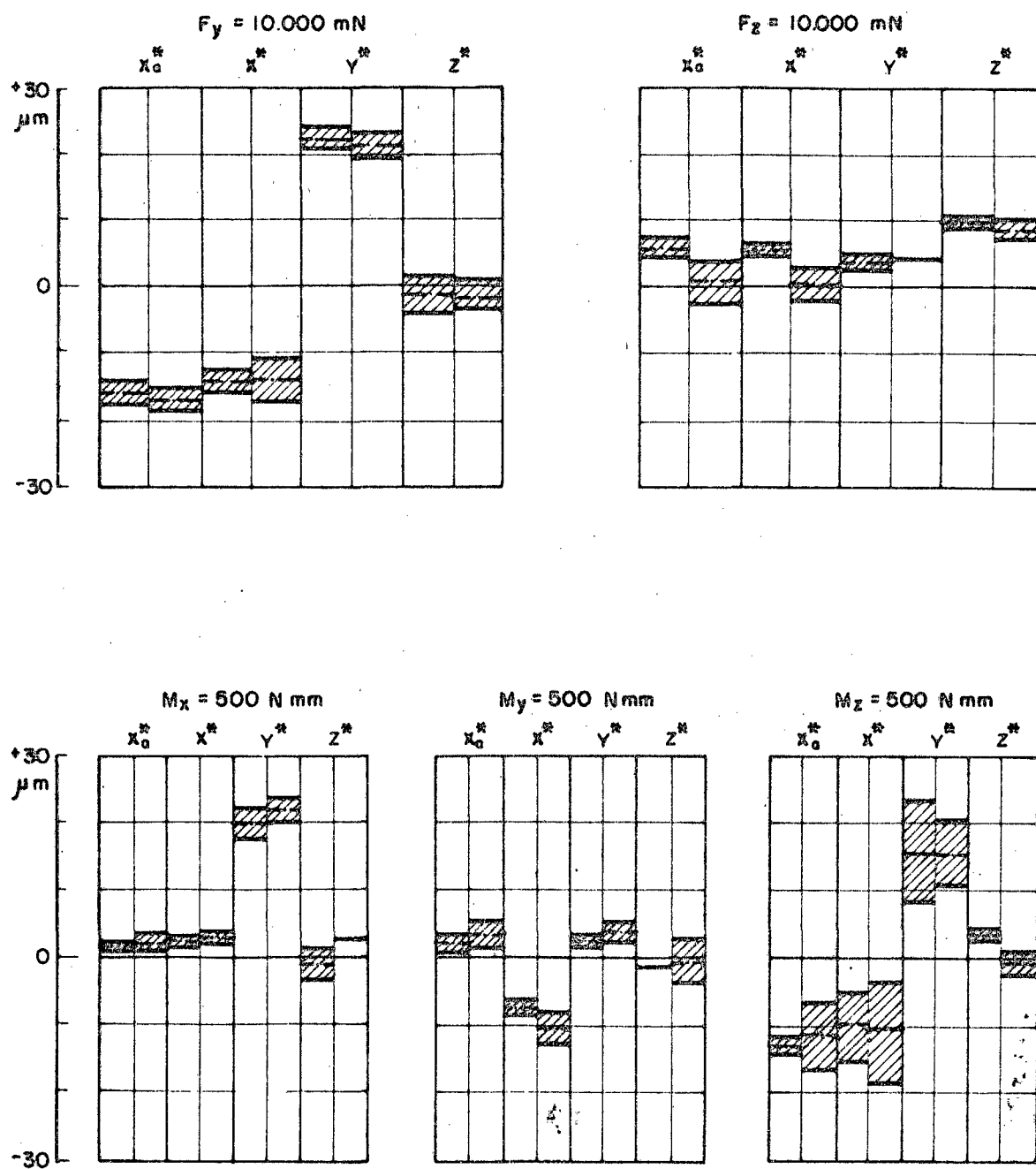


Fig. 7.6 - Erro na direção de medição ( $X_a^*$ ,  $X^*$ ) e erro de posição ( $Y^*$ ,  $Z^*$ ) devidos às forças  $F_y$  e  $F_z$  e aos momentos  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$  no apalpador com espessura de mola 0,10 mm.

## 7.2 - Resultados dos ensaios com sistemas de duas molas paralelas

A equação para força em sistemas de duas molas lamina-  
das paralelas (fig. 4.2, esquema 1, grupo I) é

$$F = \frac{24 E I x}{\ell^3}$$

Substituindo  $I = bh^3/12$ , fica:

$$x/F = K(\ell/h)^3, \text{ onde } K = 1/2Eb \quad (\text{m/N})$$

A partir das equações obtidas experimentalmente, foram calculados os valores constantes K para cada experiência da tabela 6.1.

Na figura 7.7 estão registrados os valores de K para as molas 0,2, 0,4 e 0,8 mm em função da relação  $\ell/h$ . A faixa horizontal representa os limites do coeficiente K teórico, calculados utilizando  $E = 2,06 \times 10^8 \text{ mN/mm}^2$  (valor usual para o aço) e  $E = 1,89 \times 10^8 \text{ mN/mm}^2$  (valor determinado experimentalmente para as molas testadas).

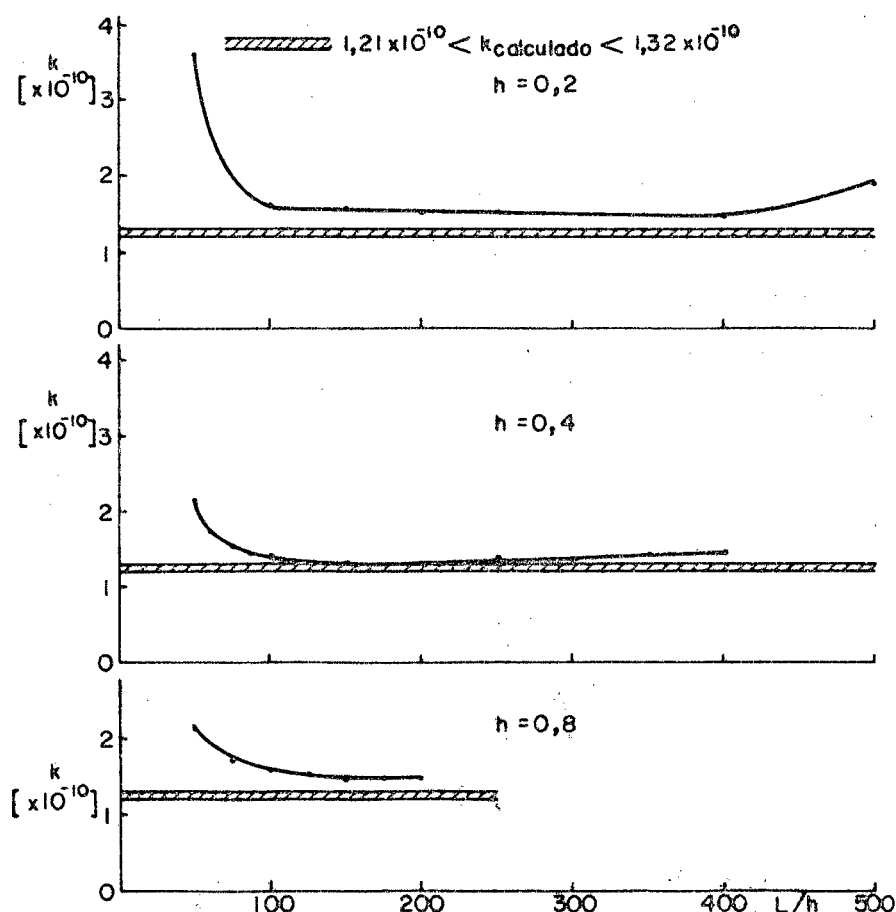


Fig. 7.7 - Coeficiente K para duas molas paralelas.

## 8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 8.1 - Forças de medição

#### 8.1.1 - Forças dos apalpadores na direção nominal x

As forças médias dos apalpadores obtidas experimentalmente podem ser comparadas com as calculadas através da equação

$$F/x = \frac{192 EI}{\ell^3}$$

Espessura da mola (mm)	F/x (mN/ $\mu$ m) experimental média	$F/x = \frac{192 EI}{\ell^3}$	Erro relativo (%)
0,03	1,05	0,97	+8,2
0,05	5,21	4,50	+15,8
0,10	35,51	36,02	-1,4

Os valores elevados dos erros relativos para os apalpadores com força de medição pequena são devidos a uma maior influência dos erros sistemáticos do banco de ensaios. Para o apalpador com espessura de mola 0,10 mm, a força de medição é grande e o efeito dos erros sistemáticos é bastante reduzido. O maior erro relativo (15,8%) foi considerado aceitável tendo em vista os objetivos deste trabalho que é encontrar faixas de valores que permitam cálculos prévios para projeto de apalpadores.

Para uma mola, figura 8.1, considerando  $M = (1/2)F \ell$ , temos:

$$\frac{d^2x}{dy^2} = \frac{F}{EI} \left( \frac{1}{2}\ell - y \right)$$

Para as condições de contorno:

$$\text{em } 0: y = 0, x = 0, \frac{dx}{dy} = 0$$

$$\text{em } A: y = 0, \frac{dx}{dy} = 0$$



e efetuando os cálculos:

$$x = \frac{F}{2EI} y^2 \left( \frac{1}{2} \ell - \frac{1}{3} y \right) \quad (8.1)$$

para um deslocamento  $x$  na extremidade  $A$ ,  $y = \ell$ , fica

$$x = \frac{F}{EI} \frac{\ell^3}{12} \quad (8.2)$$

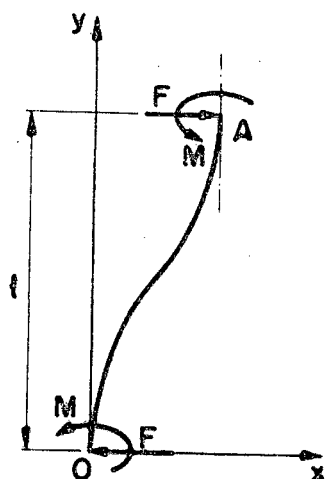
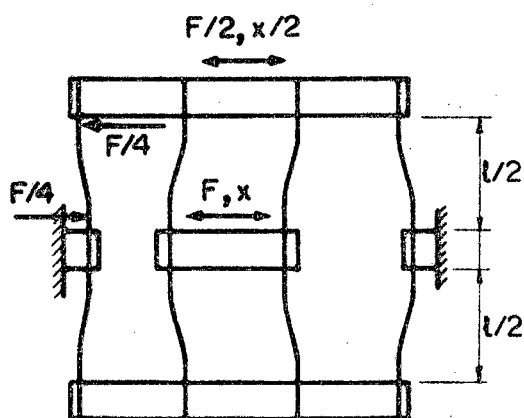
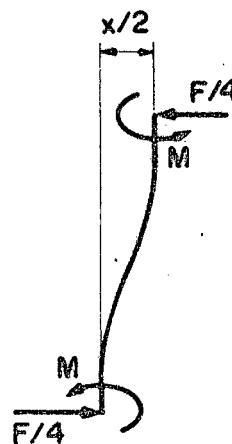


Fig. 8.1

O sistema utilizado no apalpador ensaiado é mostrado na figura 8.2a e o diagrama de corpo livre para uma das molas, na figura 8.2b.



(a)



(b)

Fig. 8.2.

Aplicando a equação (8.2) nas condições da figura 8.2b tem-se

$$\frac{x}{2} = \frac{F/4}{EI} \frac{(\ell/2)^3}{12}$$

ou

$$F = 192 \frac{EI}{\ell^3} x$$

### 8.1.2 - Forças nos sistemas de duas molas paralelas

O coeficiente  $K$  para duas molas paralelas foi calculado no capítulo anterior e é igual a  $K = 1/2Eb$  (m/N).

Como a largura  $b$  das molas foi mantida constante, o coeficiente  $K = 1/2Eb$  não deveria variar. Entretanto, pode ser verificado na figura 7.7, que para relações  $\ell/h < 100$ , o valor de  $K$  aumenta rapidamente. Este fato é provavelmente devido ao sistema, para comprimentos  $\ell$  pequenos em relação à largura  $b$ , comportar-se como placa ao invés de viga. As referências [20,21,22] apresentam soluções para placas de comprimento infinito e soluções aproximadas para comprimentos finitos. Considerando a noção de largura efetiva, o valor de  $K$  deve ser tabelado em função das relações dimensionais.

O conhecimento das faixas de  $\ell/h$  em que o coeficiente  $K$  não varia serve de orientação para a escolha das proporções geométricas das molas para aplicação em apalpadores. Nos apalpadores ensaiados neste trabalho, as relações foram:

Espessura de mola (mm)	$\ell/h$
0,03	466
0,05	280
0,10	140

## 8.2 - Análise comparativa dos erros de medição dos apalpadores ensaiados

Devido ao grande número de resultados obtidos das experiências e para uma melhor avaliação comparativa entre os apalpadores ensaiados, duas diferentes análises foram feitas:

- análise dos erros de medição dos apalpadores para um mesmo deslocamento;
- análise dos erros de medição dos apalpadores quando sujeitos à aplicação de forças e momentos iguais.

## 8.2.1 - Erros para um mesmo deslocamento

Para o cálculo das forças e momentos foi considerado um curso de 100  $\mu\text{m}$  e uma haste de 100 mm (115 do centro geométrico do apalpador até o centro da ponta esférica). As forças e momentos neste caso são:

Espessura da mola (mm)	Forças (mN)	Momentos (N.mm)
	$F_y, F_z$	$M_x, M_y, M_z$
0,03	105	12
0,05	521	60
0,10	3551	408

Os erros foram calculados utilizando as equações citadas no capítulo 6. A figura 8.3 mostra graficamente o resultado desta análise que pode ser resumido na tabela 8.1.

Tabela 8.1

Espessura da mola (mm)	Erro de medição $\mu\text{m}$ ou % do curso devido ao deslocamento.	Deflexões parasitas ( $\mu\text{m}$ ou % do curso)	Erro de medição e posição ( $\mu\text{m}$ ou % do curso) devido a forças e momentos.
0,03	<0,4	<0,4	<0,5*
0,05	<0,02	<0,3	<3,0
0,10	<0,15	<2,5	<10,0*

(\*) exceto um valor

Da tabela 8.1 pode ser concluído:

- os erros na direção de medição e as deflexões parasitas foram <0,5% exceto um valor (<2,5%); isto mostra pouca influência das espessuras das molas nos referidos erros.

- os erros na direção de medição e os erros de posição aumentam com a espessura da mola quando atuam forças  $F_y$  e  $F_z$  e momentos  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$  correspondentes à força de medição para o curso considerado.

- o apalpador com espessura de mola 0,03 mm apresentou erro mínimo <0,5%.

### 8.2.2 - Erros dos apalpadores quando sujeitos a uma mesma força e a um mesmo momento.

Para esta análise foram calculados os erros dos apalpadores quando sujeitos à atuação de forças nas direções y e z de 1 N e momentos com eixos em x, y e z de 100 N.mm. A figura 8.4 mostra graficamente os resultados desta análise. Na figura pode ser observado:

- Os erros na direção de medição ( $X_a^*$ ,  $X^*$ ) ficam na faixa <3,0  $\mu\text{m}$  excetuando três casos (apalpador 0,03 devido a  $F_y$ , apalpador 0,03 devido a  $M_y$  e apalpador 0,05, devido a  $M_z$ ).
- Os erros devidos à força na direção z são significativamente menores que os erros devidos à força na direção y.
- Os erros devidos aos momentos são tendenciosamente maiores nos planos normais aos seus eixos de aplicação, como era esperado.

### 8.3 - Aplicações práticas dos resultados obtidos

Apalpadores podem ser utilizados em sistemas 3D de duas maneiras diferentes:

- apalpadores que realizam medições cumulativamente com réguas eletro-ópticas;
- apalpadores em que o contato serve de referência para a zeragem do sistema que mede, utilizando somente réguas eletro-ópticas.

Para o primeiro caso, maiores cursos são exigidos e os resultados indicam o apalpador com mola 0,03 mm (mais fina) como o mais adequado por apresentar menores erros e menor força para um mesmo deslocamento (fig. 8.3).

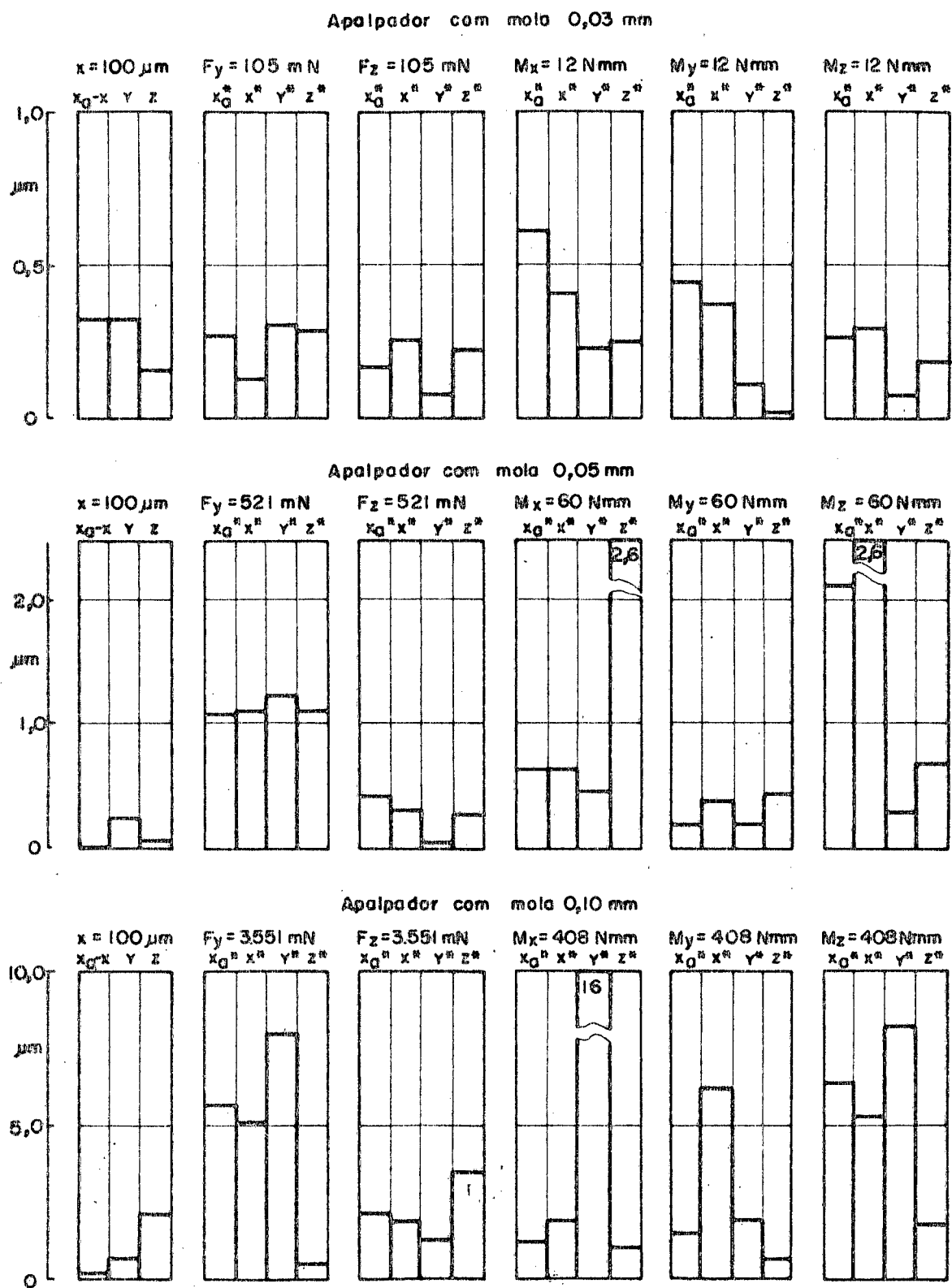


Fig. 8.3 - Erros dos apalpadores para um curso de 100  $\mu\text{m}$  e comprimento de haste 100 mm.

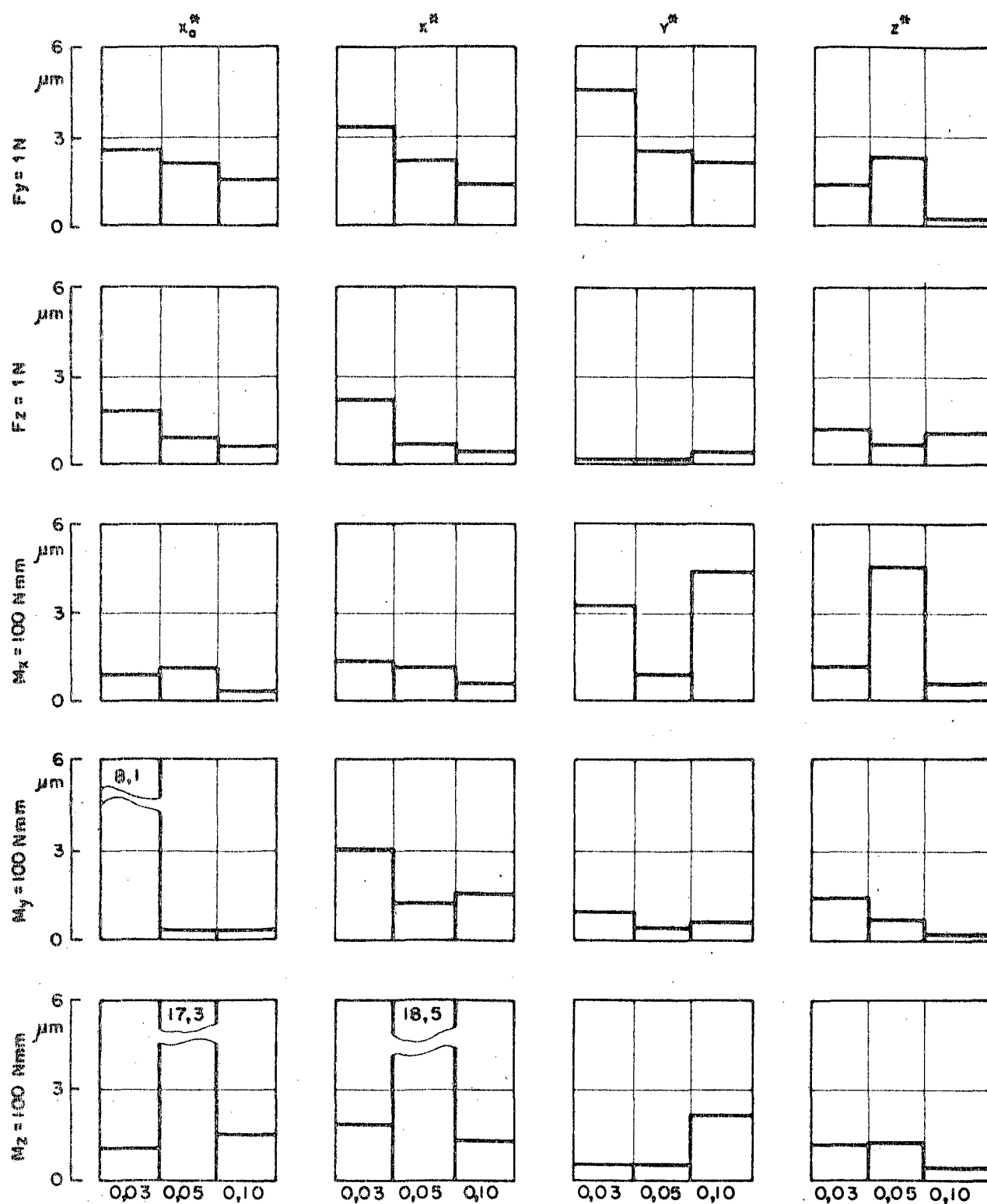


Fig. 8.4 - Erros de medição (X<sub>a</sub><sup>\*</sup>, X<sup>\*</sup>) e erros de posição (Y<sup>\*</sup>, Z<sup>\*</sup>) devidos à aplicação de forças F<sub>y</sub> e F<sub>z</sub> (1 N) e momentos M<sub>x</sub>, M<sub>y</sub> e M<sub>z</sub> (100 N.mm).

No segundo caso, os deslocamentos são bastante pequenos e consequentemente as forças e momentos também serão pequenos. Neste caso, o apalpador com mola 0,10 mm (mais grossa) é o adequado por apresentar menores erros em relação aos outros dois, para forças e momentos iguais (fig. 8.4).

Ainda com base nas análises comparativas realizadas pode-se obter um apalpador 3D com pequenos erros, combinando elementos com diferentes espessuras de molas e diferentes cursos. Por exemplo, o apalpador com espessura de mola 0,10 mm pode ser usado na direção  $z$  com pequeno curso e servindo de sustentação para os elementos nas direções  $x$  e  $y$  com espessuras de molas de 0,03 mm e cursos maiores.

Os resultados servem também para estimativas dos erros dos apalpadores se montados em sistema 3D. Como exemplo, foi considerado um apalpador, para operar em 3D, com comprimento de haste 60 mm (comprimento médio usual em apalpadores) e curso de 200  $\mu\text{m}$ , com espessuras de molas 0,03 mm. A figura 8.5 mostra esquematicamente este apalpador e a tabela 8.2, as forças e momentos máximos que atuam em cada elemento, obtidos do âbaco da figura 8.6.

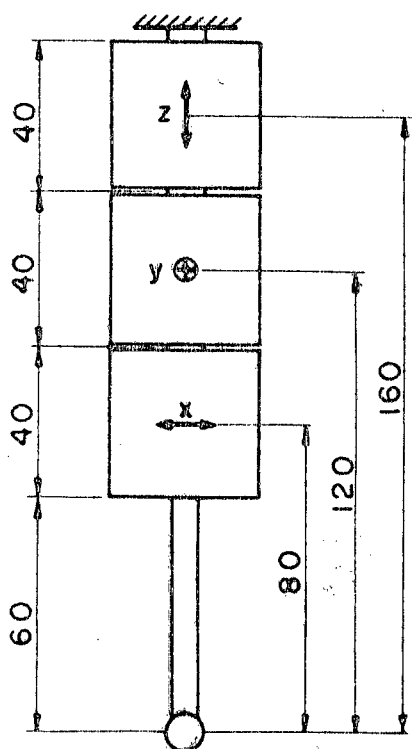


Fig. 8.5 - Apalpador 3D

Tabela 8.2 - Forças e momentos máximos (apalpador 3D - 0,03 mm)

Direção de medição do elemento	Força máxima (mN) $F_y$ $F_z$		Momento máximo (N.mm) $M_x$ , $M_y$ , $M_z$		
x		210			16,8
y		210			25,2
z		210			33,6

Utilizando as figuras 7.2 e 7.3 (capítulo 7), podemos calcular os limites dos erros para o apalpador do exemplo. A tabela 8.3 apresenta os limites dos erros na direção de medição e erros de posição calculados.

Tabela 8.3 - Erros em (%) do curso total 200  $\mu\text{m}$   
(apalpador 3D - 0,03 mm)

Direção de medição do elemento	Erros na direção de medição		
	Devido ao deslocamento	Devido a $F_y$ e $F_z$	Devido a $M_x$ , $M_y$ e $M_z$
x	0,8	0,8	1,1
y	0,8	0,8	1,7
z	0,8	0,8	2,2
	Erros de posição		
	Deflexões parasitas	Devido a $F_y$ e $F_z$	Devido a $M_x$ , $M_y$ e $M_z$
x	0,9	0,8	1,1
y	0,9	0,8	1,7
z	0,9	0,8	2,2

O erro total esperado na direção de medição e de posição para cada elemento pode ser calculado usando-se o RMS (root mean square). A tabela 8.4 apresenta os valores obtidos deste cálculo.



Tabela 8.4 - Erros totais esperados para um apalpador 3D, com espessura de mola 0,03 mm e curso de 200  $\mu$ m.

Direção de medição do elemento	Erro total esperado na direção de medição (% do curso)	Erro total esperado de posição (% do curso)
x	1,58	1,63
y	2,04	2,08
z	2,47	2,50

Com base na tabela 8.4, pode-se concluir:

- os limites dos erros na direção de medição e de posição para um apalpador 3D, com mola 0,03 mm, curso 200  $\mu$ m e comprimento de haste 60 mm são <2,5%.

- os erros foram super-estimados considerando que na aplicação de forças, foram introduzidos momentos com eixos normais à direção de aplicação; e na aplicação de momentos foram introduzidas forças nas direções normais aos eixos de aplicação. No item 8.4, este fato é discutido mais detalhadamente.

- o apalpador do exemplo pode operar com excepcionais características para um curso de 20  $\mu$ m, considerando que os limites de erros na direção de medição e de posição para cada elemento será <0,25%.

#### 8.4 - Comportamento do banco de ensaios

As análises feitas nos itens anteriores tiveram como objetivo mostrar os erros dos apalpadores com base nos resultados dos ensaios. Os erros entretanto são influenciados por um grande número de fatores devidos ao instrumental utilizado no banco de ensaios e são também inerentes ao próprio apalpador. Os erros de natureza sistemática do banco de ensaios foram reduzidos por correções introduzidas no programa do SAS utilizando os fatores de calibração.

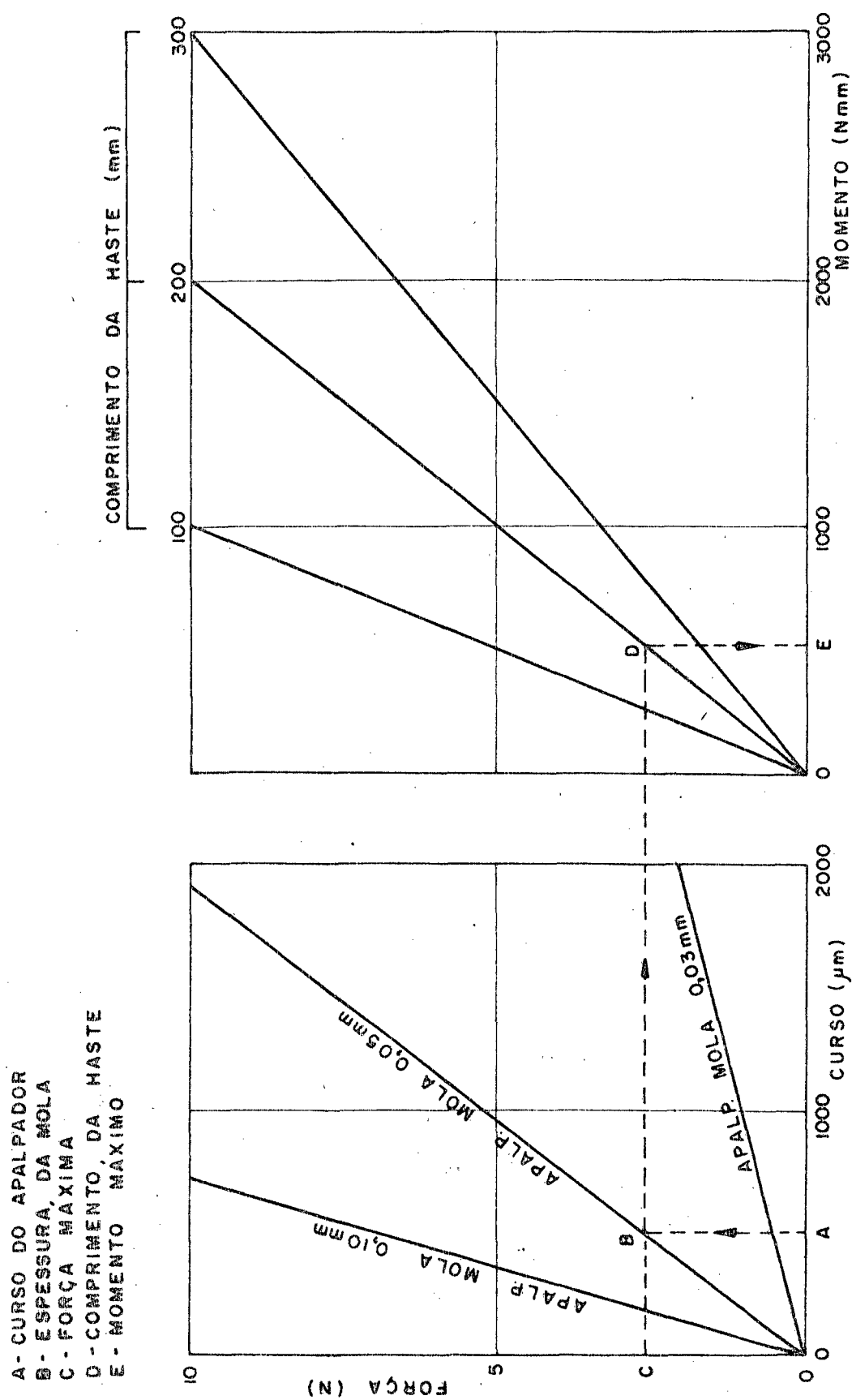


Fig. 8.6 - Âbaco para o cálculo de forças e momentos máximos que atuam em um apalpador.

#### 8.4.1 - Erros do padrão de deslocamentos

Os erros sistemáticos na medição de deslocamentos ficam na faixa  $< 0,5\%$ , considerando que as correções introduzidas usaram os fatores de calibração médios das escalas. Erros de natureza acidental atingiram, em alguns casos isolados, a faixa de 4% como por exemplo, a deflexão parasita na direção z do apalpador com molas 0,10 mm, como mostra a figura 7.2.

#### 8.4.2 - Erros do padrão de forças

Os erros sistemáticos na medição das forças aplicadas ficam na faixa  $< 5\%$ , também devidos às correções terem sido feitas com os valores médios dos fatores de calibração obtidos para cada escala. Os erros de natureza acidental podem ser observados nos gráficos dos resultados das figuras 7.3, 7.4 e 7.5. Nestas figuras pode ser verificado que os erros devidos à aplicação de forças na direção y são consideravelmente maiores que os devidos a forças na direção z. Este efeito tem como principais razões:

- a aplicação de forças na direção y introduz momento com eixo em x, devido ao comprimento da haste.
- maiores deflexões estruturais no suporte do apalpador.
- maiores deslocamentos no acoplamento, feito através de rosca, da haste com o apalpador.
- maiores deflexões da haste
- maiores deformações nos engastamentos das molas.

#### 8.4.3 - Erros no padrão de momentos

Os testes com aplicação de momentos foram os mais susceptíveis a falhas devidas, principalmente, aos seguintes fatores:

- os momentos com eixos em x e y foram aplicados através de alavancas com pesos calibrados e no momento com eixo em z,

ra-

a força foi aplicada utilizando uma mola calibrada. Os padrões foram portanto diferentes.

- o acoplamento do eixo da alavanca no apalpador foi feito através de rosca, o que provocou deslizamentos e deslocamentos.

- na aplicação dos momentos com eixo em x e y foi necessário um prolongamento no eixo devido à própria construção do apalpador, fator que introduz momento em eixo normal ao desejado.

#### 8.4.4 - Erros devidos à deflexão estrutural

Os erros devidos à deflexão estrutural do banco de ensaios foram minimizados através de:

- estrutura de suporte dos apalpadores suficientemente rígida em relação às forças e momentos aplicados.

- Compensação das deflexões através de apalpadores indutivos usuais.

- temperatura mantida na faixa de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

#### 8.4.5 - Erros devidos ao atrito e vibrações

Os gráficos dos ensaios realizados mostram uma dispersão aleatória dos pontos plotados, responsável pelo baixo valor do coeficiente de correlação, excetuando os de força na direção nominal x,  $F = f(x)$ . As principais causas deste efeito são:

Atrito - devido principalmente à força de contato mantida entre a ponta do apalpador e os blocos dos dispositivos de teste (capítulo 5).

Vibrações - o processo manual e intermitente de aplicação de forças e momentos introduz vibrações no sistema, além das vibrações devidas ao ambiente.

### 8.5 - Erros devidos ao próprio apalpador

Os principais fatores que provocaram deflexões parasitas no movimento dos apalpadores ensaiados foram:

- imprecisões na fabricação dos blocos.
- a não uniformidade elástica e não igualdade dimensional das molas.
- proporção geométrica não favorável entre os blocos e as molas.

A tolerância de fabricação dos blocos e das molas foi de  $\pm 0,02$  mm, face aos meios disponíveis. Para um apalpador com alta precisão no paralelismo do movimento é desejável uma tolerância de  $\pm 0,002$  mm [15], portanto dez vezes mais apertada.

Para uma otimização das proporções geométricas seriam necessários ensaios variando a largura e comprimento das molas, e o comprimento dos blocos entre molas, o que não foi feito por limitação de tempo.

Devido a estes fatores, a montagem dos apalpadores tornou-se bastante trabalhosa e introduziu pequenas deflexões nas molas, responsáveis por tendências dos apalpadores em determinadas direções.

### 8.6 - Sugestões para futuras experiências com apalpadores

Os principais melhoramentos que podem ser introduzidos nas experiências são:

- a. Maior grau de automatização nas experiências utilizando um eletro-ímã, para aplicação das forças e momentos.
- b. Alinhamento entre os blocos dos dispositivos de ensaios, utilizando interferometria LASER.
- c. Isolamento do banco de ensaios das vibrações ambientais.
- d. Maior número de experiências com cada apalpador fazendo vá-

rias montagens, de modo a permitir uma análise estatística dos resultados.

- e. Ensaios com apalpadores variando as proporções geométricas entre blocos e molas, visando uma otimização dimensional.

## 9. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir:

1. É possível a construção de apalpadores, com guias de molas laminadas, aplicáveis em sistemas de medição padrão fixo e em máquinas 3D, utilizando um jogo de peças intercambiáveis.
2. Os apalpadores com espessuras de molas 0,03 e 0,05 mm apresentaram um erro máximo ( na direção de medição e deflexões parasitas) <1% para curso de 400  $\mu\text{m}$  e <2% para curso de 2000  $\mu\text{m}$ . O apalpador com espessura de mola 0,10 mm apresenta erro na direção de medição <1,5% e deflexões parasitas <4% para curso de 400  $\mu\text{m}$ .
3. Os resultados permitem estimativa dos erros quando o apalpador opera em 3D. O teste da sistemática adotada, para um apalpador com espessura de mola 0,03 mm e comprimento de haste 60 mm, mostrou que os erros na direção de medição e de posição são < 2,5% para um curso de 200  $\mu\text{m}$  e <0,25% para um curso de 20  $\mu\text{m}$ .
4. A análise comparativa dos apalpadores ensaiados, para um curso de 100  $\mu\text{m}$  e comprimento de haste 100 mm mostrou que
  - a) os apalpadores apresentaram erro mínimo na direção de medição <0,5%. As deflexões parasitas são também <0,5% com exceção do apalpador com mola de 0,10 mm.
  - b) os erros de posição devidos a forças e momentos máximos para o curso considerado foram <0,5%, <3% e <10% para os apalpadores com espessura de molas 0,03, 0,05 e 0,10 mm, respectivamente.
5. A análise comparativa dos apalpadores ensaiados, com aplicação de uma mesma força e um mesmo momento, mostrou que apalpadores com espessura de molas 0,10 mm podem ser usados em sistemas onde o apalpador funciona como referência de zeragem, com pequenos erros.

6. É possível a construção de um apalpador 3D com mínimos erros, combinando elementos com diferentes espessuras de molas e diferentes cursos.



## BIBLIOGRAFIA

1. Niemann, Gustav, "Elementos de máquinas II", Editora Edgard Blücher Ltda. pp. 131, 1971.
2. Trumpold, H., Messtechnik und Ingenieurtätigkeit - Die Technische Gemeinschaft 15, pp. 25-27, 1967.
3. Beckwith, T.G. & Buck, N.L., "Mechanical Measurements", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp. 12-13, 1973.
4. Hommel Werke (Catálogo)
5. DIN 19233
6. TESA - Instruments for linear measurement, pp. 54, 1979.
7. ZEISS, Universal Messmaschine UMM 500, (Catálogo)
8. Kozel, J., Metrologia - Curso básico, Apostila do Curso de Engenharia Mecânica - UFSC, 1979.
9. Farago, F.T., "Handbook of dimensional measurement", Industrial Press, NY - USA, pp. 299-300, 1968.
10. Roark, Raymond, J. "Formulas for stress and strain", McGraw-Hill, pp. 319-320, 1965.
11. Shigley, "Dinâmica das máquinas", Editora Edgard Blücher Ltda. pp. 26-29, 1969.
12. Bottacini, M.R., "Instruments and measurement", Bell & Howell Company, pp. 5, 1975.
13. Norton, Harry, N., "Handbook of transducers for electronic measuring systems", Princeton Hall Inc., pp. 208-209, 1969.

14. Schmehmann, P., Untersuchungen über das Messkraft- und Anzeigeverhalten von induktiven Feinzeigern unterschiedlicher Bauart, Diss. Tu-Hannover, 1975.
15. Jones, R.V., Parallel and retilinear spring movements, J. Sci. Instrum., 28, pp. 38-41, 1951.
16. Jones, R.V., Some parasitic deflections in parallel spring movements, J. Sci. Instrum., 33, pp. 11-15, 1956.
17. Breiting, R., "Lösungskataloge für Sensoren, Teil I: Federführungen und Federlenke", Verlag Krausskopf, Mainz, 1976.
18. Bisshopp, K.E., "Calculating large deflections of cantilever beams, Spring design and application", Nicholas P. Chironis ed., pp. 112, 1961.
19. Plainevaux, J.E., Mouvement parasite vertical d'une suspension élastique symétrique à compensation et asservissement. Il nuovo cimento, Vol. XI, N. 6, pp. 629, 1954.
20. Wellaner, E.J., Bending strength of gear teeth by cantilever plate theory, J. Engng. Ind., pp. 213-222, 1960.
21. Holl, D.L., Cantilever plate with concentrated edge load. Am. Soc. Mech. Eng. Paper A-8, Journal Appl. Mech., Vol. 4, No. 1, 1937.
22. Jaramillo, T.J., Deflections and moments due to a concentrated load on a cantilever plate of infinite length, Journal Appl. Mech., pp. 67-72, 1950.
23. Bosch, - Längenmesstechnik, Informationen, 1970/71.
24. Doebelin, Ernest O., "Measurement systems: application and design", McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., pp. 217-220, 1975.

25. Lücke, H.; Schneider, C.A., Aplicação de um sistema de aquisição de sinais para calibração de transdutores. Trabalho submetido para apresentação ao V COBEM, Campinas, 1979.
26. Schneider, C.A.; Lücke, H.A., Emprego de sistemas de aquisição de sinais, Trabalho submetido para apresentação ao V COBEM, Campinas, 1979.
27. Lücke, H., Soares, J.S.I., Contribuição ao projeto de apalpadores de medição de comprimentos suspensos em guias de molas em forma de lâminas", Trabalho submetido para apresentação ao V COBEM, Campinas, 1979.